Università degli Studi di Ferrara

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

Modellazione geometrica 3D di una biella con testa in un solo pezzo

Relatore:
Prof. Denis Benasciutti

Laureando:
Francesco Rossi

Correlatori:
Ing. Alessio Suman
Ing. Nicola Aldi

Anno Accademico 2017/2018

Sommario

Introduzione

Capitolo 1

Commento sulle peculiarità della modellazione 5

Capitolo 2

Rugosità 7

2.1) Definizioni generali UNI 3963/1 7

2.2) Calcolo della rugosità 10

2.3) Giustificazione delle rugosità di piede, testa e fusto biella 11

Capitolo 3

Schema esplicativo della tolleranza dimensionale, disegno della zona di tolleranza, indicazione degli scostamenti, giustificazione della tolleranza 13

3.1) Termini e definizioni UNI ISO 286/1 13

3.2) Gradi di tolleranza IT (International Tollerance) 15

3.3) Posizioni delle tolleranze e scostamenti 16

3.4) Accoppiamenti con tolleranze ISO 17

3.5) Sistemi di accoppiamento albero-base e foro-base 18

3.6) Tolleranze dimensionali generali: UNI ISO 2768/1 21

3.7) Relazione tra tolleranza e rugosità 21

3.8) Analisi tolleranza piede e testa biella 22

Capitolo 4

Interpretazione tolleranze geometriche e giustificazione della scelta 25

4.1) Tolleranza di parallelismo assi dei fori piede e testa biella 25

4.2) Tolleranza di parallelismo tra due piani.....26

Capitolo 5

Descrizione processo produzione biella.....27

5.1) Caratteristiche acciaio 16NiCrMo2 28

5.2) Tecnologie di lavorazione meccanica 29

5.2.1) Colata.....29

5.2.2) Deformazione plastica 30

5.2.3) Sinterizzazione 31

5.2.4) Lavorazione dal pieno.....31

5.3) Trattamenti termici.....32

5.3.1) Cementazione.....32

5.3.2) Tempra.....34

5.3.3) Rinvenimento.....36

5.4) Scelta del mezzo di tempra.....37

5.5) Lavorazioni di finitura 38

5.5.1) Rettifica.....38

5.5.2) Lappatura.....38

5.6) Trattamento termico di distensione.....39

Capitolo 6

Durezza da raggiungere dopo i trattamenti termici.....41

6.1) Prova di durezza Rockwell 42

Capitolo 7

Progettazione di massima della biella veloce per motore endotermico.....43

7.1) Le masse.....43

7.2) Verifica a fatica.....46

7.3) Verifica all'instabilità elastica.....47

8.4) Le teste.....49

Conclusioni

Bibliografia

Introduzione

L'obiettivo di questo elaborato è quello di modellare con SolidWorks una biella in acciaio 16NiCrMo2 UNI 7846 (nome standardizzato sostituito AS G18) con testa in un solo pezzo, adatta a cinematismi biella-manovella di motori endotermici con albero smontabile per interferenza, e la sua corretta messa in tavola, partendo da un progetto già sviluppato. Verranno elencati i vari passaggi più peculiari usati nella modellazione e i metodi di quotatura più efficaci nel disegno meccanico del pezzo.

Sono esplicate le tecniche per la creazione del semilavorato della biella a partire direttamente dal metallo fuso per piccole serie o campioni di prova o per stampaggio partendo da una billetta in caso di medie-grandi serie, e altre due tecniche non adatte a questo specifico progetto di biella ma comunque ormai affermate nella produzione di questi organi da parte delle più svariate case produttrici di motori veloci per autoveicoli, come la sinterizzazione e la lavorazione dal pieno. Sono elencati in successione i vari trattamenti termochimici e termici a cui deve essere sottoposto il materiale per garantire le adeguate caratteristiche di durezza superficiale e di tenacità a cuore partendo da una analisi accurata del materiale utilizzato per la produzione.

Successivamente ai vari trattamenti vengono esposti i processi di lavorazione meccanica e nello specifico quelli di finitura, che essendo superficiali, quindi dove la durezza è elevata, ed in zone molto importanti della biella per il suo corretto funzionamento, come la testa e il piede, sono eseguite attraverso rettifica e successiva lappatura, per raggiungere le adeguate dimensioni con tolleranze strette ed alta precisione.

Viene descritto anche il processo termico di distensione che avviene per ultimo alla fine di tutti i trattamenti e di tutte le lavorazioni meccaniche.

Nell'ultimo capitolo, Capitolo 7, vengono esposti i problemi principali da risolvere per la progettazione di una biella e le principali relazioni per un suo corretto dimensionamento di massima. Si trattano esplicitamente i problemi della suddivisione teorica delle masse, la verifica a fatica e il fenomeno dell'instabilità elastica, in quanto una biella è un organo in rotazione che lavora principalmente in compressione ed essendoci una eccentricità c'è anche un momento flettente non trascurabile sopra i 3000 giri/min.

Capitolo 1 Commento sulle peculiarità della modellazione

La modellazione del piede di biella, Figura 1.1, ha richiesto alcuni accorgimenti in quanto dal disegno fornito si nota che il foro per lo spinotto è cilindrico, ma il piede non è creato per rivoluzione con un andamento cilindrico di diametro maggiore rispetto al foro. Difatti lo spessore è maggiore nella parte più esterna del piede e minore nei fianchi laterali. L'aumento di materiale nel punto più estremo del piede è analizzato nel Capitolo 7.

Per modellare questa parte è stato necessario creare il perimetro del piede Figura 1.2 che è formato da due semicerchi R12 se nella mezzeria della biella o R11 se nella parte laterale. I due semicerchi sono collegati da due segmenti lineari lunghi 1,2mm. Una volta disegnato il profilo attraverso una *estrusione con sweep* si forma il piede di biella; il foro e la fresatura si creano successivamente attraverso altri due schizzi e successivo taglio estruso.

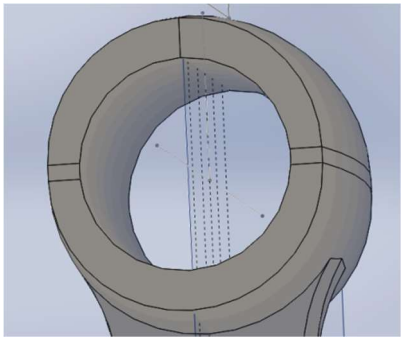


Figura 1.1 Piede di biella modellato, notare i tratti lineari e i due semicerchi

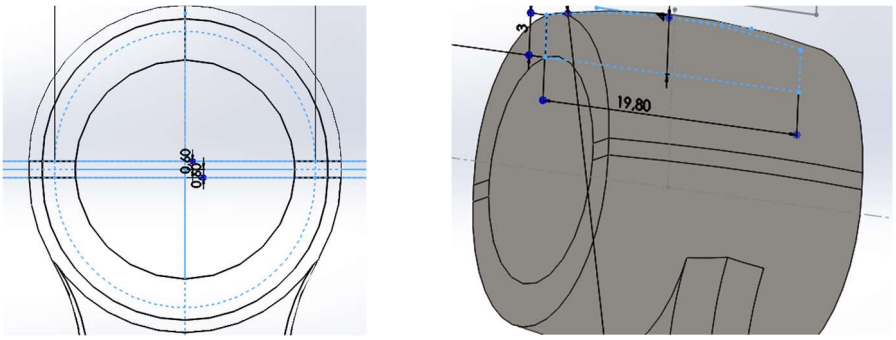


Figura 1.2 Percorso che la sezione del piede di biella deve fare e schizzo della sezione del piede di biella

Un'altra particolarità è creare il fusto della biella che si rastrema lungo la lunghezza principale, Figura 1.3. Per semplificare questa modellazione è bastato creare lo schizzo nel piano superiore (sezione lungo direzione principale) e con una semplice estrusione si crea il fusto rastremato.

I lati del fusto però non sono rettilinei ma dalla mezzeria inclinati di 10° in ambedue le direzioni, per crearli viene usa la funzione *smusso inclinato*.

Questa inclinazione presente a semicerchio anche in testa e piede serve nello stampaggio come angolo di sformo per l'estrazione del semilavorato dallo stampo della pressa in caso di forgiatura per medie-grandi serie.

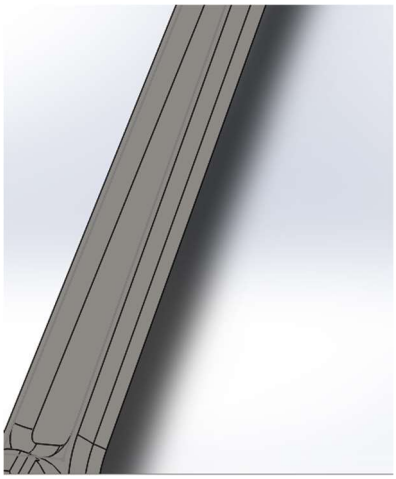


Figura 1.3 Fusto di biella, notare rastremazione e angoli di sformo

Capitolo 2 Rugosità

2.1 Definizioni generali UNI 3963/1

Lo stato della superficie di un oggetto si chiama rugosità, viene designato nelle tabelle UNI con "Ra" e dipende dal tipo di lavorazione che ha subito. Nei disegni la rugosità si indica mediante un numero espresso in micron µm.

L'importanza della rugosità delle superfici è legata all' aspetto estetico dell'oggetto e alla sua funzionalità. La rugosità delle superfici deve essere prevista in fase di progetto e deve essere indicata sul disegno tecnico assieme alla quotatura.

La prescrizione della rugosità viene effettuata in funzione dei seguenti fattori:

- aspetto estetico della superficie del pezzo;

- tolleranze dimensionali assegnate alle varie dimensioni;

- tipo di contatto fra le superfici (fisso o mobile);

- usura prevista se le superfici sono fra di loro striscianti;

- estensione delle superfici di contatto;

- pressione esercitata sulle superfici di appoggio;

- sollecitazione presente sui pezzi.

Nella Tabella 2.1 sono riportati i valori di rugosità adottati di preferenza espressi in micron e alcune applicazioni più comuni:

Rugosità µm	Applicazioni
0.025	Superfici speculari, piani di appoggio strumenti di misura, blocchetti di riscontro
0.05	Facce di calibri, piani di appoggio calibri
0.1	Facce di calibri a corsoio, perni di centraggio, strumenti di precisione, cuscinetti volventi di qualità, superfici levigate di tenuta.
0.2	Superficie lappata senza segni visibili di lavorazione, supporti di alberi a gomito, perni di cuscinetti ad attrito radente e di riduttori
0.4	Alberi scanalati, cuscinetti alberi motori, perni di alberi a gomito, gambo delle valvole
0.8	Superficie rettificata finita bene con utensili a placchetta, bronzine, cuscinetti
1.6	Facce di ingranaggi e loro fori, alberi, teste di cilindri, superfici di tenuta con guarnizione
3.2	Superficie finita di utensile normale con tracce di lavorazione visibili
6.3	Superficie finita con alti avanzamenti
12.5	Superfici ottenute per fusione o con sgrossature grezze

Tabella 2.1 Valori di rugosità Ra e loro applicazioni più comuni

Nella Tabella 2.2 si riportano le rugosità ottenibili con le principali lavorazioni sui materiali metallici. Nella prima parte della tabella sono riportate le rugosità delle superfici ottenute senza asportazione di truciolo e nella seconda parte quelle con asportazione di truciolo. I valori di rugosità più frequenti sono indicati da aree rettangolari, quelle delle rugosità meno frequenti da aree triangolari.

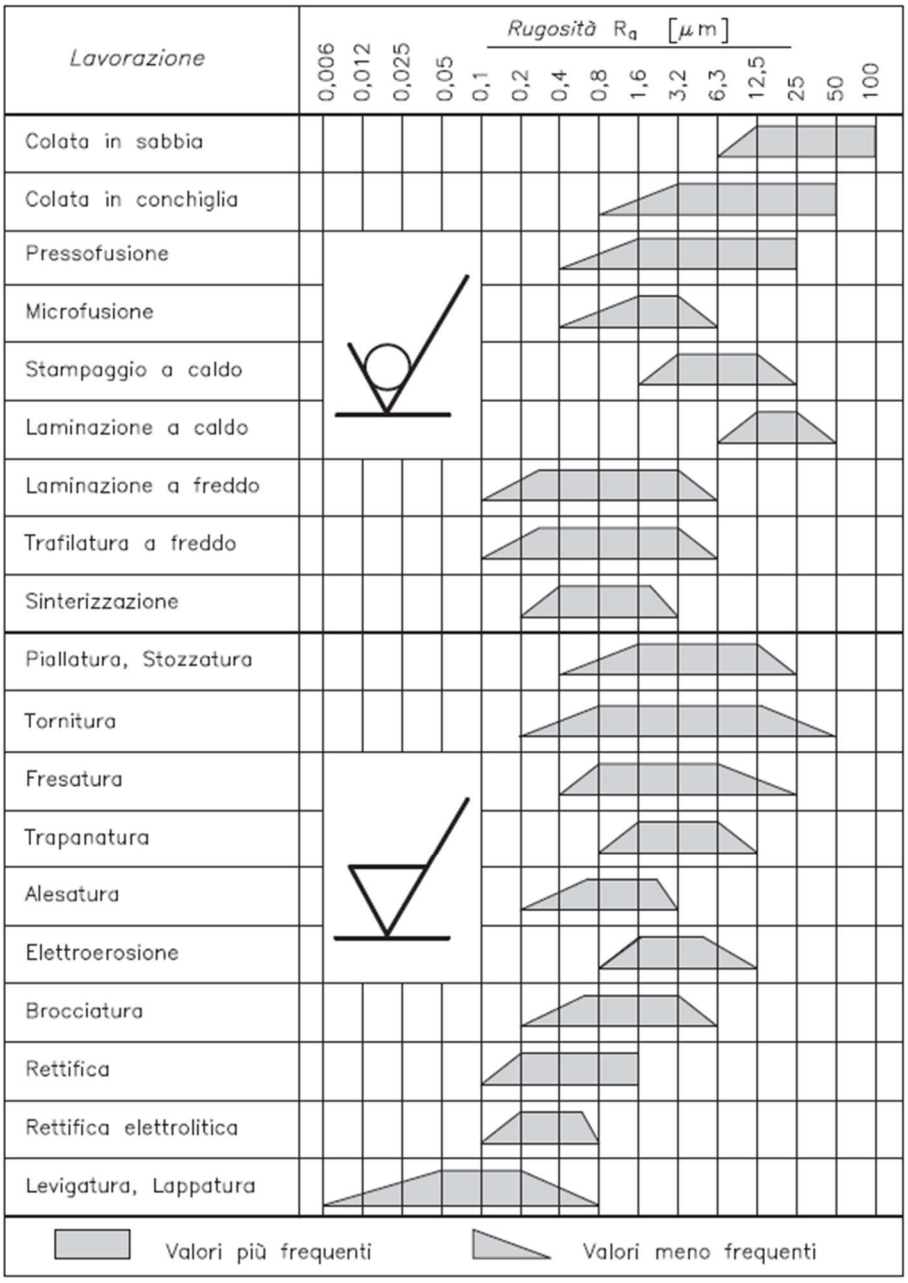


Tabella 2.2 Relazione tra tipo di lavorazione e rugosità

Si riportano di seguito alcune definizioni che servono per identificare gli elementi di una generica superficie utili alla determinazione della rugosità, Figura 2.1.

- Superficie nominale: superficie ideale che delimita un corpo separandolo dall'ambiente e rappresentata con il disegno.

- Superficie reale: superfici del pezzo effettivamente realizzata con la lavorazione.

-Superficie rilevata: superficie rilevata con gli strumenti di misura che rappresenta con approssimazione quella reale.

- Superficie media: superficie di compenso uguale a quella nominale ma che giace in una posizione tale da rendere minima la somma dei quadrati delle distanze della superficie reale, il volume delle parti sporgenti dalla superficie media eguaglia il volume di quelle rientranti.

- Sezione normale trasversale: sezione che si ottiene dall'intersezione fra la superficie e un piano perpendicolare alla direzione delle irregolarità superficiali.

- Sezione normale longitudinale: sezione che si ottiene dall'intersezione fra la superficie e un piano parallelo alla direzione delle irregolarità superficiali.

- Profilo: contorno di una sezione per ciascuna superficie definita; si avrà il profilo medio come contorno della superficie media, il profilo trasversale come contorno della sezione trasversale e della superficie trasversale.

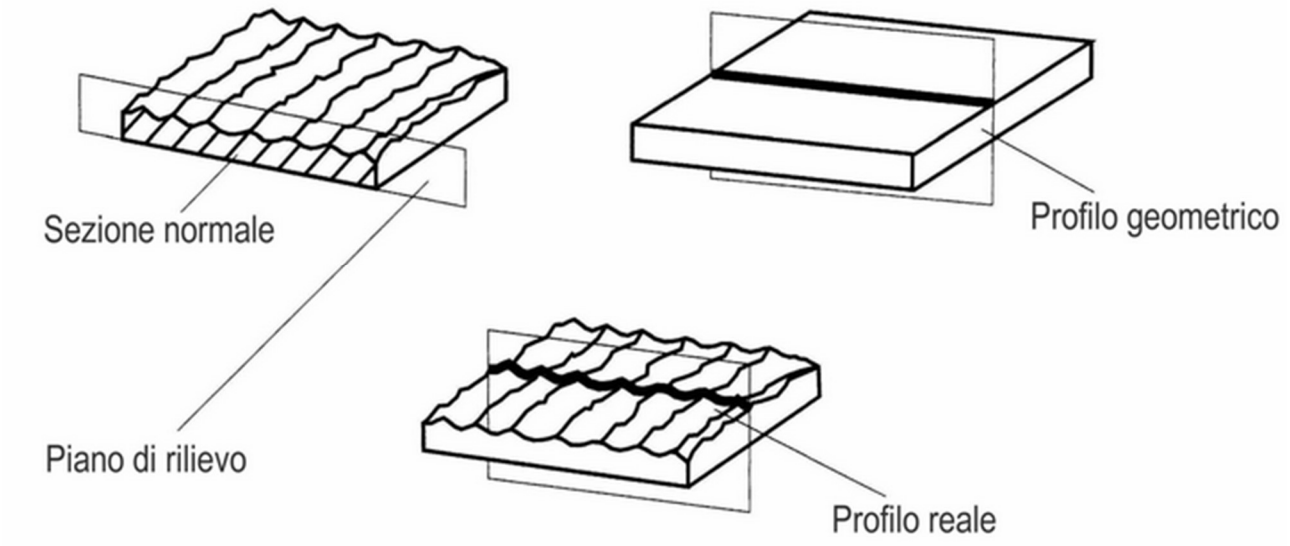


Figura 2.1 Definizione di alcuni parametri che caratterizzano la rugosità

2.2 Calcolo della rugosità

Si definisce rugosità e si indica con Ra il valore medio, espresso in micron µm, delle distanze y_1 , y_2 , …y_n del profilo rilevato con gli strumenti sulla superficie reale, misurate in valore assoluto rispetto alla linea media Figura 2.2.

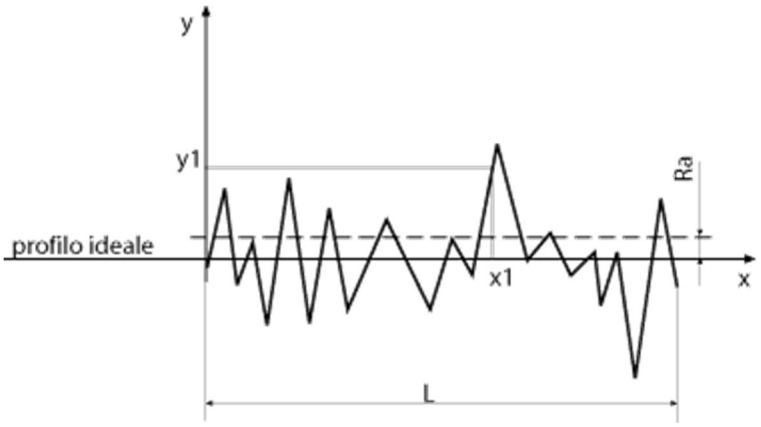


Figura 2.2 Sezione trasversale di una superficie reale

In riferimento alla Figura 2.2 e considerando la distanza in valore assoluto, con n rilevamenti ad intervalli regolari, la rugosità si calcola con la seguente equazione (2.1):

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i|}{n} \quad (2.1)$$

Il costo di produzione cresce con l'aumentare del grado di finitura superficiale richiesto, pertanto è conveniente assegnare valori di rugosità più alti possibile e prescriverla soltanto sulle superfici la cui funzionalità è condizionata dalla rugosità stessa, come si può vedere dalla Figura 2.3.

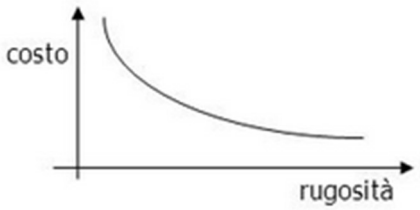


Figura 2.3 Costo della rugosità

2.3 Giustificazione delle rugosità di piede, testa e fusto biella

Nella Tabella 2.3 si riporta genericamente il collegamento tra le rugosità Ra più utilizzate e le tipologie meccaniche di utilizzo. Questo serve per interpretare in modo più chiaro le tolleranze descritte nel disegno sulla testa, piede e fusto.

Rugosità		*Applicazioni*
µm	µin	
0,025 ÷ 0,05	1 ÷ 2	Piani di appoggio di micrometri, specchi e blocchi di riscontro, facce di calibri d'officina, piani di appoggio e comparatori.
0,1 ÷ 0,2	4 ÷ 8	Facce di calibri a corsoio, perni di articolazione, utensili di precisione, cuscinetti super finiti, accoppiamenti stagni ad alta pressione a tenuta di liquido, superfici levigate di tenuta senza guarnizione, superfici lappate senza segni di lavorazione visibile, sopporti di alberi a gomiti e alberi a camme, perni di biella, cilindri pompe idrauliche, cuscinetti precisi, guide di macchine utensili.
0,4	16	Alberi scanalati, cuscinetti per alberi motori, stantuffi, gambo valvola, perni di albero a gomito, cuscinetti di metallo bianco, pattini di scorrimento e relative guide.
0,8	32	Superfici rettificate, finite bene d'utensile a placchetta, con tracce di lavorazione appena visibili, tamburi per freni, fori brocciati, bronzine, cuscinetti, denti ingranaggi.
1,6	63	Facce ingranaggi e loro fori, alberi, teste cilindro, facce di pistoni, superfici di tenuta di flange con guarnizioni metalliche.
3,2	125	Superfici finite d'utensile normale, con tracce di lavorazione visibili, superfici di accoppiamento di parti fisse smontabili, perni e cuscinetti per trasmissioni a mano.
6,3	250	Superfici di tenuta di flange con guarnizioni comuni.
12,5	500	Superfici sgrossate.

Tabella 2.3 collegamento tra campi di rugosità e utilizzo delle superfici

Sul piede di biella è definita una rugosità per asportazione di truciolo pari a 0.8 µm. Non è una rugosità troppo spinta in quanto non è una superficie in cui si hanno interazioni con rulliere o cuscinetti che hanno bisogno di una superficie molto liscia. Questa superficie serve solo a creare interferenza con una bronzina al cui interno verrà inserito uno spinotto e per attrito radente si genererà il moto tra le due parti.

La superficie interna di questo foro è realizzata attraverso una rettifica poco spinta in termini di precisione e quindi rugosità oppure attraverso una alesatura molto spinta per esempio con una fresa ed utensile a placchetta per raggiungere valori tali di Ra.

Questo valore di Ra pari a 0.8 µm è perfettamente congruo alla tolleranza prescritta non causando uscite dal campo di tolleranza che è 0 mm; +0.018mm, Capitolo 3.8, rispetto alla quota di Ø16 mm perché la rugosità essendo 0.0008 mm va a modificare la quarta cifra dopo la virgola. Restando in un campo di tolleranza che va da 0 mm a +0.017mm la rugosità non crea alcun tipo di problema perché se sommata al campo di tolleranza si ha 0.0008 mm; +0.0178 mm che è perfettamente all'interno del campo di tolleranza e garantisce un'ottima interferenza.

La superficie si presenterà molto liscia e con segni di lavorazione appena visibili.

Sulla testa di biella è definita una rugosità per asportazione di truciolo pari a 0.2 µm. È una rugosità molto spinta in quanto è una superficie in cui si ha un'interazione con una rulliera o altre tipologie di cuscinetti aperti che hanno bisogno di una superficie molto liscia dove scorrere creando un attrito volvente molto basso. La superficie per garantire una durata più lunga della tolleranza a causa del rotolamento dei vari rullini deve essere indurita e questo avviene attraverso un processo termochimico di cementazione.

La superficie interna finita di questo foro è realizzata attraverso rettifica oltre che per le specifiche del disegno fornito, a causa della durezza superficiale con un valore di HRC 60 per una profondità di $1^{+0.2}_{0}$mm e della rugosità Ra molto bassa da ottenere sulla superficie cementata.

La superficie si presenterà completamente liscia senza segni visibili di lavorazione, usata sempre nei perni di biella e genericamente nei punti di appoggio di alberi motore o camme.

Il fusto della biella non ha tolleranze specifiche indicate ma ricade nella sezione delle tolleranze generali in quanto sul fusto della biella non si hanno relazioni con altri oggetti.

La tolleranza generale è senza asportazione di truciolo ciò ci indica il metodo di costruzione della biella che può essere per stampaggio a caldo, colata in stampo di sabbia o per sinterizzazione.

Capitolo 3

Schema esplicativo della tolleranza dimensionale, disegno della zona di tolleranza, indicazione degli scostamenti, giustificazione della tolleranza

Le dimensioni reali di un oggetto differiscono sempre da quelle nominali, cioè quelle previste dal disegno, di una certa quantità che dipende dalla tipologia di lavorazione. La dimensione nominale espresso dalla quota rappresenta perciò il valore di riferimento per la dimensione indicata dalla stessa.

Si definisce tolleranza lo scarto dimensionale, cioè l'errore, ammesso nella lavorazione. Il valore risulta essere la differenza tra il valore della dimensione massima e minima ammesse. Le lavorazioni con tolleranza sono indispensabili per garantire l'intercambiabilità dei pezzi nel sistema di lavorazione in serie, proprio come nel caso di una biella dove è importante e necessaria nel caso di sostituzione.

3.1 Termini e definizioni UNI ISO 286/1

La norma stabilisce un sistema di codifica ISO per tolleranze da utilizzarsi per dimensioni lineari di caratteristiche geometriche dei seguenti tipi: a) cilindro; b) due superfici parallele ed opposte. Essa definisce i concetti fondamentali e la terminologia relativa per questo sistema di codifica e fornisce una selezione normalizzata di classi di tolleranze a scopi generali tra le numerose possibilità.

La terminologia relativa a questo sistema di tolleranza viene definita in questa lista:

- *Albero*: termine usato convenzionalmente per indicare elementi esterni anche non cilindrici.
- *Foro*: termine usato convenzionalmente per indicare elementi interni anche non cilindrici.
- *Dimensione nominale*: valore di quota attribuita dal disegno a una dimensione. Il valore implica la posizione della linea dello zero e viene indicata con D_n per i fori o elementi interni, e d_n per elementi per alberi o elementi esterni. La dimensione nominale è affiancata da degli scostamenti in base alla tipologia del pezzo e della lavorazione da effettuare.
- *Dimensione effettiva*: è la dimensione reale di un oggetto dopo che è stato lavorato e rilevata attraverso apposite apparecchiature di misurazione.
- *Scostamento*: differenza algebrica fra la dimensione effettiva, cioè quella reale e la dimensione nominale, cioè la teorica; può essere negativo o positivo e viene calcolato in base se foro o albero. Lo scostamento può essere visto anche in funzione della linea dello zero. In questo modo troviamo lo scostamento superiore o inferiore. Lo scostamento superiore è la differenza algebrica tra la dimensione massima e nominale.

$$E= D_{eff}-D_n \qquad e=d_{eff}-d_n$$

$$ES=D_{max}-D_n \qquad es=d_{max}-d_n$$

$$EI = D_{min} - D_n \qquad ei = d_{min} - d_n$$

- *Dimensione massima*: è la massima dimensione ammessa, somma algebrica tra la dimensione nominale e lo scostamento superiore:

$$D_{max} = D_n + ES \qquad d_{max} = d_n + es$$

- *Dimensione minima*: è la minima dimensione ammessa, somma algebrica tra la dimensione nominale e lo scostamento inferiore:

$$D_{min} = D_n + EI \qquad d_{min} = d_n + ei$$

- *Gioco*: quando il foro è dimensionalmente più grande dell'albero si ha una differenza positiva tra la dimensione del foro e quella dell'albero:

$$G = D - d$$

- *Interferenza*: quando l'albero è dimensionalmente più grande del foro si ha una differenza positiva tra la dimensione dell'albero e del foro:

$$I = d - D$$

Quando si mettono in relazione due elementi come un foro e un albero si crea un accoppiamento che può essere di 3 tipi:

- *Accoppiamento con gioco*: il gioco è sempre assicurato tra albero e foro, si ha quindi $d_{max} < D_{min}$. Il gioco è un campo di valori dove si trova un valore massimo e minimo:

$$G_{max} = D_{max} - d_{min} \qquad G_{min} = D_{min} - d_{max}$$

- *Accoppiamento con interferenza*: l'interferenza è sempre assicurata tra albero e foro, si ha quindi $d_{min} > D_{max}$. L'interferenza è un campo di valori dove si trova un valore massimo e minimo:

$$I_{max} = d_{max} - D_{min} \qquad I_{min} = d_{min} - D_{max}$$

- *Accoppiamento incerto*: si può verificare sia gioco che interferenza a seconda dei casi a causa delle dimensioni effettive create dalla lavorazione:

$$D_{max} < d_{min} \quad \text{e} \quad d_{max} > D_{min}$$

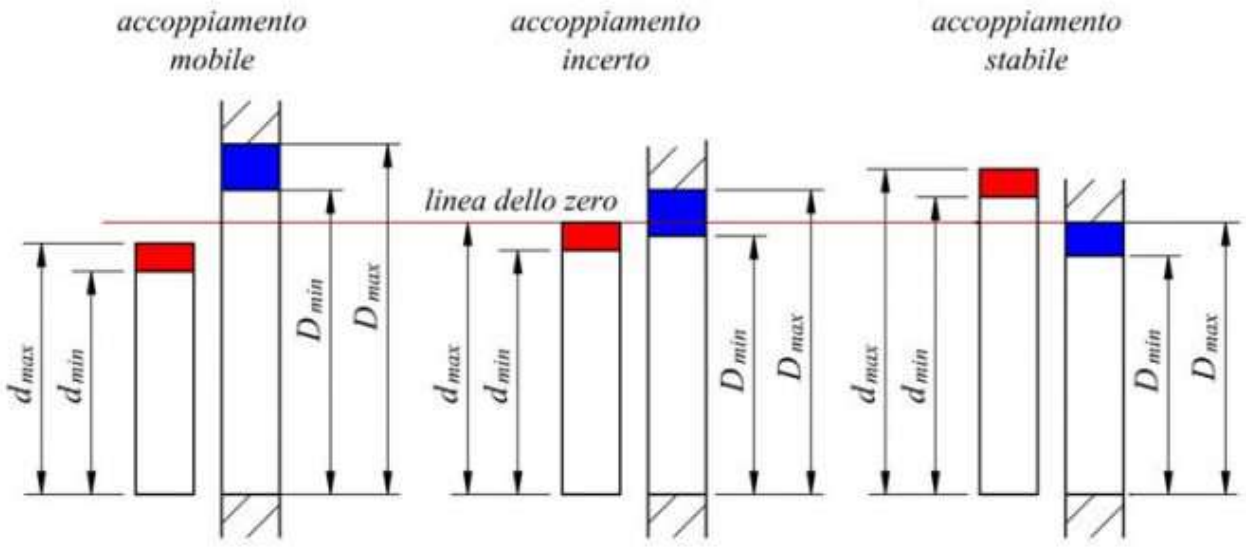


Figura 3.1 Tre tipologie di accoppiamento: mobile, incerto, stabile

3.2 Gradi di tolleranza IT (International Tollerance)

Il sistema di tolleranze ISO comprende 20 gradi di tolleranza normalizzati, designati con le sigle IT (International Tollerance) seguite da un numero. Esistono 3 macrocategorie di numeri, quelli che vanno da 01 a 0 non sono di uso generale e usate solo per la gamma di dimensioni nominali comprese tra 0 e 500mm, quelli che vanno da 1 a 18 sono di uso generale e usate per la gamma di dimensioni nominali tra 0 e 3150mm. La lavorazione è tanto più precisa quanto più piccolo è il grado di tolleranza concesso. Nella Tabella 3.1 sono riportati i valori delle tolleranze in funzione dei gruppi di dimensioni nominali e dei gradi di tolleranza IT normalizzati.

Osservando i valori riportati nella tabella si nota che:

- a parità di grado di tolleranza IT, la tolleranza aumenta man mano che la dimensione nominale diventa maggiore (colonne)

- a parità di dimensione nominale, la tolleranza aumenta man mano che il grado di tolleranza IT cresce, questo esprime qualità di lavorazioni meno precise e più grossolane (righe)

Dimensione nominale in mm	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
	μm											mm						
fino a 3	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
oltre 3 fino a 6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
oltre 6 fino a 10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
oltre 10 fino a 18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
oltre 18 fino a 30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
oltre 30 fino a 50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
oltre 50 fino a 80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,20	1,9	3	4,6
oltre 80 fino a 120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
oltre 120 fino a 180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
oltre 180 fino a 250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
oltre 250 fino a 315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
oltre 315 fino a 400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
oltre 400 fino a 500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
oltre 500 fino a 630	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
oltre 630 fino a 800	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
oltre 800 fino a 1000	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
oltre 1000 fino a 1250	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
oltre 1250 fino a 1600	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
oltre 1600 fino a 2000	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
oltre 2000 fino a 2500	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
oltre 2500 fino a 3150	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

Tabella 3.1 Valori delle tolleranze: UNI ISO 286

3.3 Posizioni delle tolleranze e scostamenti

Nel sistema di tolleranze dimensionali ISO le posizioni delle tolleranze sono designate da una o più lettere, maiuscole per i fori o elementi interni (da A a ZC) e minuscole per gli alberi o elementi esterni (da a a zc). Nella Figura 3.2 sono visualizzate le posizioni delle tolleranze per gli alberi e per i fori. È importante notare come a ogni posizione di tolleranza corrisponda un diverso valore dello scostamento fondamentale, che a volte coincide con lo scostamento superiore e a volte con quello inferiore, poiché viene sempre fatto coincidere con la minima distanza della tolleranza dalla linea dello zero.

Nelle tabelle della normativa ISO 286 sono riportati i valori numerici degli scostamenti fondamentali degli alberi e dei fori, in base al diametro e al grado IT.

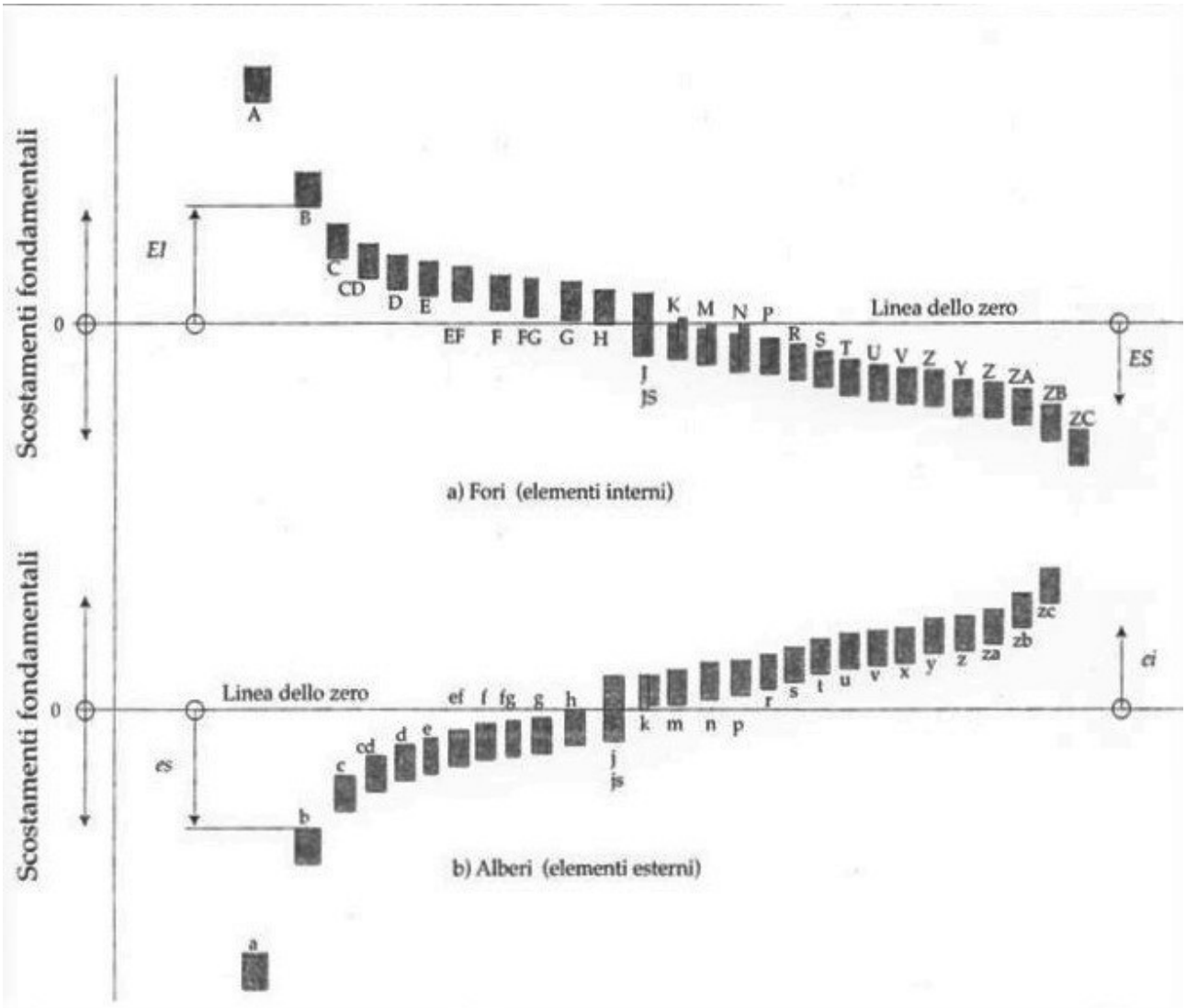


Figura 3.2 Posizione delle tolleranze per alberi e fori

3.4 Accoppiamenti con tolleranze ISO

Alberi e fori possono essere collegati tra loro per dare origine a un accoppiamento. Nel caso si tratti di componenti non cilindrici, gli accoppiamenti consistono nella connessione della dimensione esterna di un oggetto con quella interna di un altro oggetto (accoppiamento prismatico).

Nel sistema di tolleranze ISO gli accoppiamenti vengono designati con la dimensione nominale, comune ai due elementi, seguita dalle lettere e dai numeri che indicano rispettivamente, prima il foro poi per l'albero, la posizione e il grado di tolleranza, per esempio:

Ø 35 H7/p6

Nell scelta dei gradi di tolleranza occorre tenere presente che si lavorano più facilmente le parti esterne (alberi) di quelle interne (fori). Perciò, soprattutto nelle lavorazioni precise, si accoppiano alberi con grado di tolleranza IT(n) con fori di grado IT(n+1). Nella Figura 3.3 viene schematizzata la relazione fra i gradi di tolleranza e le lavorazioni.

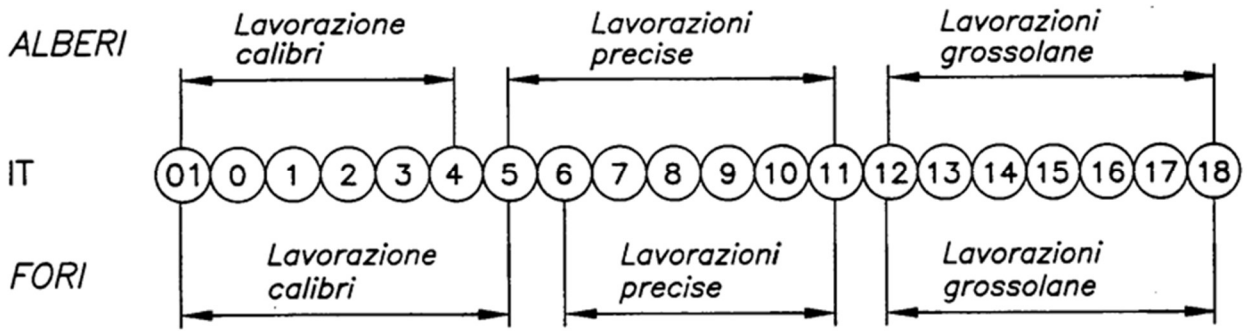


Figura 3.3 Relazione tra gradi di tolleranza IT e lavorazioni

3.5 Sistemi di accoppiamento albero-base e foro-base

I sistemi di accoppiamento albero-base e foro-base sono utilizzati per ridurre l'elevato numero di accoppiamenti possibili.

Il sistema *albero-base* realizza tutti gli accoppiamenti assegnando sempre all'albero la posizione di tolleranza h e al foro le posizioni da A a ZC, Figura 3.4. Si utilizza di preferenza questo sistema quando si usano alberi di acciaio trafilati, calibrati o rettificati forniti dalle acciaierie, già lavorati con tolleranza di posizione h.

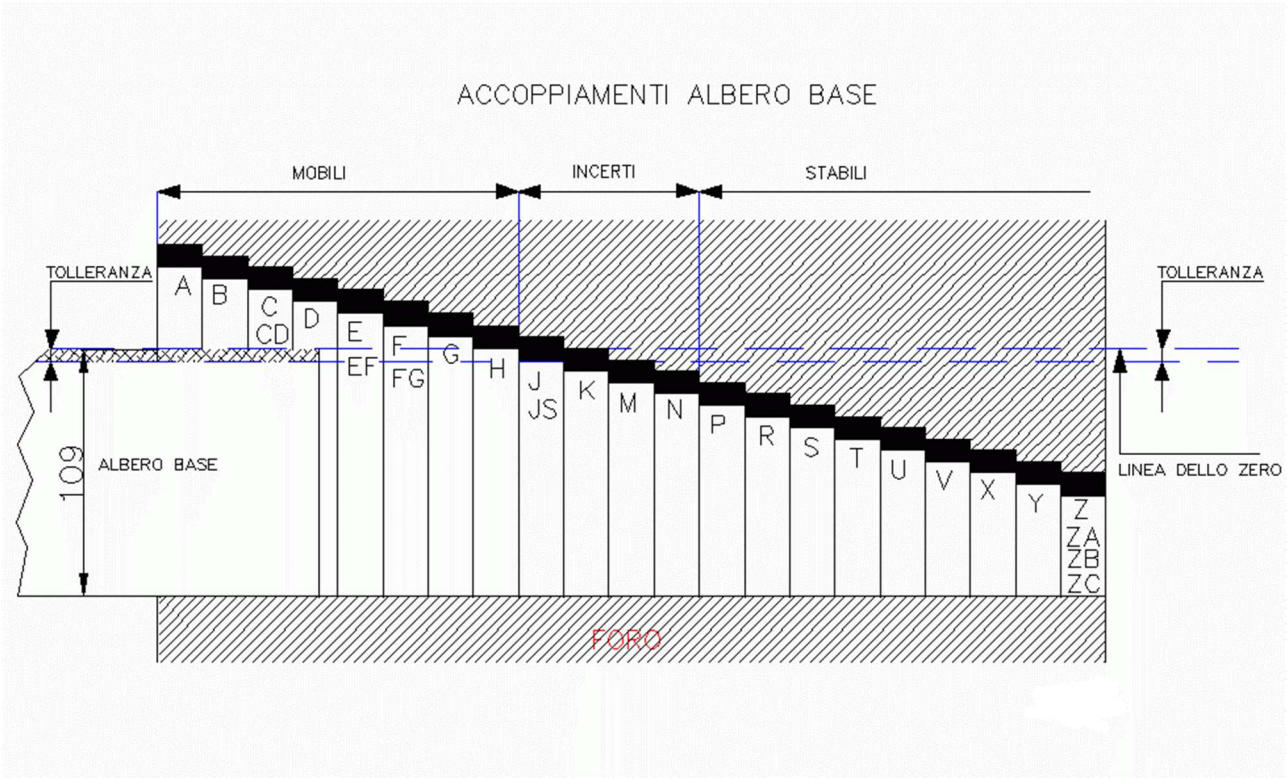


Figura 3.4 Sistema di accoppiamento albero-base

Il sistema *foro-base* realizza tutti gli accoppiamenti assegnando sempre al foro la tolleranza di posizione H e all'albero le posizioni da a a zc, Figura 3.5. Questo sistema si utilizza nell'industria

automobilistica, nell'industria aeronautica, nella costruzione delle macchine utensili e, in generale, quando si vuole ridurre gli alesatori per la finitura dei fori e i calibri di controllo.

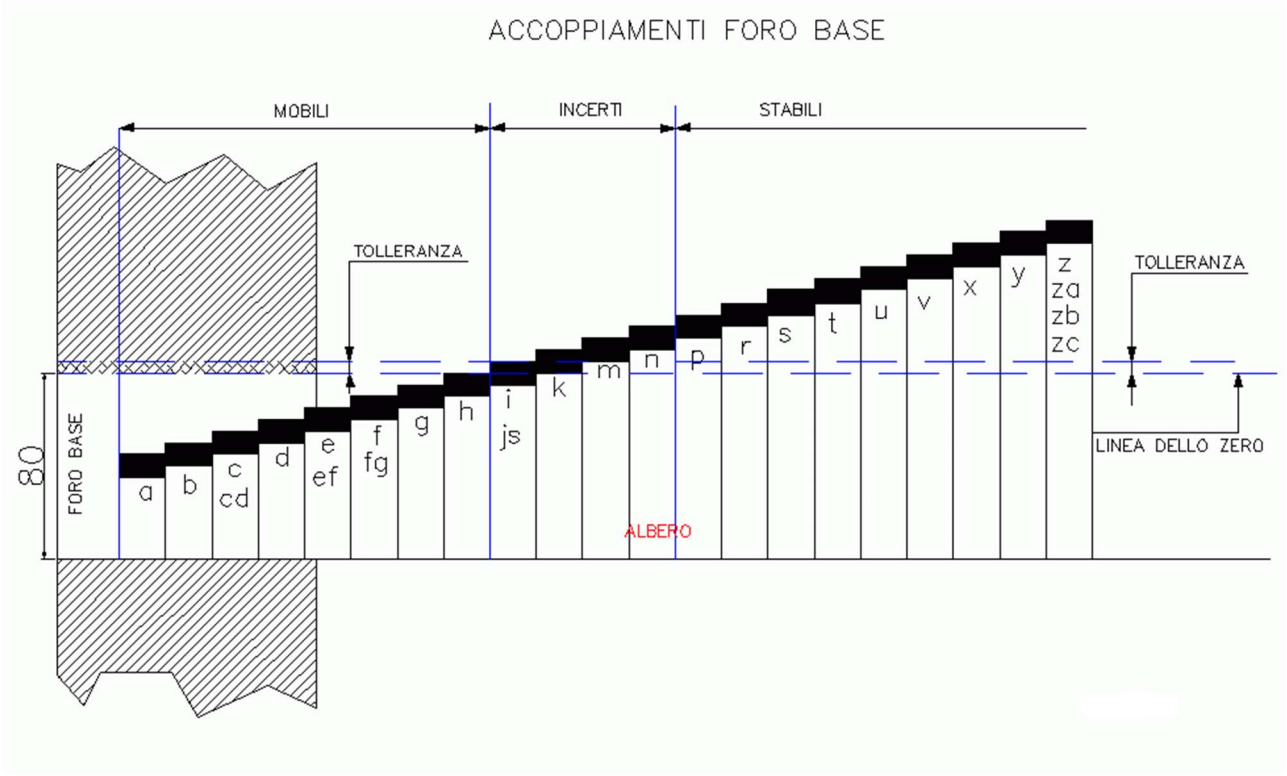


Figura 3.5 Sistema di accoppiamento foro-base

Allo scopo di limitare ulteriormente la gamma degli accoppiamenti che si possono realizzare con le diverse posizioni delle tolleranze, le norme UNI ISO raccomandano l'uso preferenziale di alcuni accoppiamenti che garantiscono la funzionalità e assicurano economia di fabbricazione.

Nelle Tabelle 3.2 e 3.3 si riporta una rassegna di accoppiamenti raccomandati da utilizzare nella progettazione, di impiego più comune, rispettivamente foro-base (utilizzato nel nostro caso) e albero-base con le rispettive applicazioni in funzione della precisione e del tipo di accoppiamento.

PRECISIONE	LIBERO	MOBILE DI SCORRIMENTO	BLOCCATO LEGGERO	BLOCCATO SERRATO
ALTA	**H6/g5** Parti rotanti lubrificate; acciaio bonificato rettificato	**H6/h5** Accoppiamento di centratura lubrificato internamente	**H6/n5** Parti non bloccate assialmente (vincolo torsionale linguetta o profili scanalato)	**H6/p5** Parti da considerarsi un sol pezzo
BUONA	**H7/g6** Accoppiamenti rotanti con buona centratura; lubrificazione mediocre	**H6/h6** Alberi veloci poco caricati	**H7/n6** Parti bloccate assialmente (senza linguetta o scanalato); buona centratura	**H7/r6** Trasmissione con carichi assiali e torsionali senza linguette o scanalati
MEDIA	**H7/f7** Accoppiamenti rotanti veloci; centratura imperfetta	**H7/h6** Centratura di scorrimento; comandi idraulici di precisione	**H8/n8** Ingranaggi di forza da smontare raramente	
GROSSOLANA	**H11/d11** Macchine agricole; apparati di sollevamento; organi esposti ad intemperie	**H8/f8; H8/h8** Accoppiamenti rotanti in genere con bassi carichi e limitate esigenze di centratura		

Tabella 3.2 Accoppiamenti raccomandati foro-base di impiego comune

PRECISIONE	LIBERO	MOBILE DI SCORRIMENTO	BLOCCATO LEGGERO	BLOCCATO SERRATO
ALTA			**M6/h6** Smontabile senza forte pressione con vincolo rotatorio e di scorrimento assiale	
BUONA		**H6/h6** Parti con movimento relativo; alberi veloci lubrificati	**J6/h6** Senza scorrimento assiale relativo	**N6/h7** Smontabile con forte pressione
MEDIA	**E8/h7; F8/h8; H9/h8** Parti scorrevoli con gioco abbondante	**F8/h7** Movimento relativo con gioco sensibile		
GROSSOLANA	**D10/h8** Parti scorrevoli con gioco abbondante senza esigenze di precisione			

Tabella 3.3 Accoppiamenti raccomandati albero-base di impiego comune

3.6 Tolleranze dimensionali generali: UNI ISO 22768/1

Alle quote senza indicazione di tolleranza dimensionale vanno applicate le tolleranze generali per le dimensioni lineari e gli scostamenti limite ammessi per le dimensioni angolari, previsti dalla norma UNI ISO 22768/1, riportati nella Tabella 3.4. L'assegnazione delle tolleranze generali sui disegni viene fatta riportando all'interno o nei pressi del cartiglio il riferimento alla suddetta norma seguita dalle lettere f, m, c o v indicanti la classe di tolleranza prescelta.

Classe di tolleranza		**Scostamenti limite per dimensioni fondamentali**							
Designazione	Denominazione	Da 0,5 Fino a 3	Oltre 3 Fino a 6	Oltre 6 Fino a 30	Oltre 30 Fino a 120	Oltre 120 Fino a 400	Oltre 400 Fino a 1000	Oltre 1000 Fino a 2000	Oltre 2000 Fino a 4000
f	fine	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5	-
m	media	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
c	grossolana	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
v	molto grossolana	-	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 4	± 6	± 8

Classe di tolleranza		**Scostamenti limite per dimensioni angolari**				
Designazione	Denominazione	Fino a 10	Oltre 10 fino a 50	Oltre 50 fino a 120	Oltre 120 fino a 400	Oltre 400
f	fine	± 1°	± 0° 30'	± 0° 20'	± 0° 10'	± 0° 5'
m	media					
c	grossolana	± 1° 30'	± 1°	± 0° 30'	± 0° 15'	± 0° 10'
v	molto grossolana	± 3°	± 2°	± 1°	± 0° 30'	± 0° 20'

Tabella 3.4 Scostamenti limite ammessi per dimensioni lineari (mm) e per dimensioni angolari

3.7 Relazione tra tolleranza e rugosità

Le tolleranze e le rugosità risultano correlate fra loro prevalentemente nelle piccole dimensioni. Infatti, durante la fase di montaggio di due elementi accoppiati, si verifica una fase di usura, chiamata primaria, con le creste delle asperità superficiali che si appianano e si deformano attenuandosi di circa il 50%.

Questo causa una variazione delle dimensioni massime degli alberi e minime per i fori con la conseguente modifica della funzionalità dell'accoppiamento previsto dalle tolleranze assegnate.

Per questo motivo la norma ISO raccomanda i valori massimi della rugosità Ra in funzione dei valori del grado di tolleranza IT e delle dimensioni riportati nella Tabella 3.5.

In particolare, si può dire che il valore da attribuire alla rugosità superficiale:

- diminuisce con il diminuire della tolleranza

- aumenta con l'aumentare delle dimensioni

Grado di tolleranza	*Superfici cilindriche con diametri in mm*					*Superfici piane*
	0 ÷ 3	3 ÷ 18	18 ÷ 80	80 ÷ 250	250 ÷ 3150	
	Rugosità Ra [μm]					
IT6	0,2	0,32	0,5	0,8	1,25	0,5
IT7	0,32	0,5	0,8	1,25	2	0,8
IT8	0,5	0,8	1,25	2	3,2	1,25
IT9	0,8	1,25	2	3,2	5	2
IT10	1,25	2	3,2	5	8	3,2
IT11	2	3,2	5	8	12,5	5
IT12	3,2	5	8	12,5	20	8
IT13	5	8	12,5	20	32	12,5
IT14	8	12,5	20	32	50	20

Tabella 3.5 Rugosità consigliate in funzione del grado di tolleranza richiesto

3.8 Analisi tolleranza piede e testa biella

In questo caso andremo ad analizzare le tolleranze dimensionali del piede e dell'occhio di biella in cui nel primo caso è necessaria una interferenza (boccola) e nel secondo un gioco (gabbia a rulli).

Il foro del piede di biella ha una dimensione Ø 16 ^{H7} (Figura 3.6):

Grado di tolleranza IT= 7

Scostamenti della tolleranza H7= 0; +0,018

L'intervallo di tolleranza risulta quindi essere 0.018mm

Le dimensioni limite del foro sono:

Dmax= D + Es = 16 + 0.018 = 16.018mm

Dmin= D + Ei = 16 + 0 = 16mm

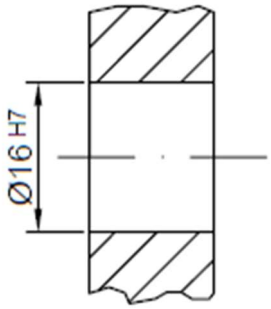
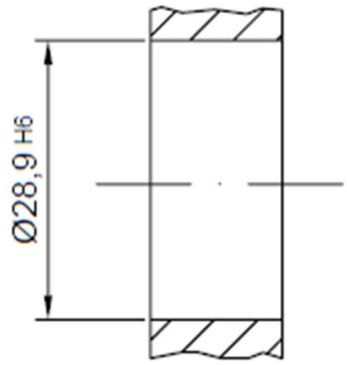


Figura 3.6 Tolleranza piede di biella

Nel piede di biella è stata scelta una tolleranza di grado IT=7 in quanto è un foro e come sappiamo è più difficile effettuare tolleranze spinte e precise in esso ed anche perché non è una superficie in cui ci saranno movimenti meccanici come lo strisciamento del perno o spinotto in quanto è una superficie in cui verrà calettata per interferenza una boccola con la funzione di bronzina.

Il foro nella testa di biella ha un diametro pari a Ø 28.9 ^{H6} (Figura 3.7):



Grado di tolleranza IT= 6

Scostamenti della tolleranza H6= 0; +0,013 mm

L'intervallo di tolleranza risulta quindi essere 0.013mm

Le dimensioni limite del foro sono:

Dmax= D + Es = 28,900 + 0.013 = 28.913mm

Dmin= D + Ei = 28.9 + 0 = 28.9mm

Figura 3.7 Tolleranza testa biella

In questo caso è stato scelto un grado IT= 6 anche se la superficie da lavorare è un foro e quindi le complicazioni per arrivare a soddisfare questi valori di precisione aumentano. La differenza con la superficie del piede di biella risiede nel fatto che in questo caso non va inserita per interferenza una boccola all'interno del foro, ma si avrà l'inserimento con gioco di un cuscinetto volvente a rulli (gabbia a rulli) e quindi è la superficie stessa a sostenere gli sforzi generati dalla combustione e dalle inerzie. Questo avviene attraverso una accurata lavorazione della superficie con rettifica e lappatura per soddisfare la precisione dimensionale ed un trattamento termochimico di cementazione per arrivare alla durezza prescritta HRC 60. In questo modo è possibile un attrito volvente sulla superficie ed una ottima durata nel tempo dell'occhio di testa della biella.

Capitolo 4

Interpretazione tolleranze geometriche e giustificazione della scelta

Le tolleranze geometriche applicate agli elementi punto, linea, superficie o piano di simmetria, definiscono la zona all'interno della quale deve essere compreso ciascun elemento, considerato che può essere un'area o uno spazio. La norma UNI 7223/1 elenca i simboli e le modalità per l'assegnazione delle tolleranze geometriche di forma, orientamento, posizione e oscillazione. I segni grafici fondamentali per l'assegnazione sui disegni delle tolleranze geometriche alle diverse entità sono riportati nella Tabella 4.1.

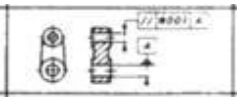
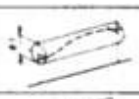
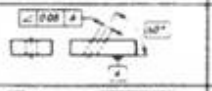
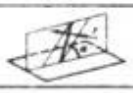
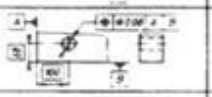
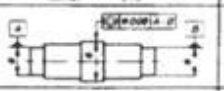
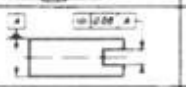
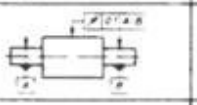
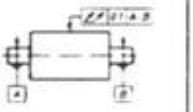
Elementi associati	Tolleranze di orientamento	//	**Parallelismo** di una linea (asse) rispetto ad una retta di riferimento			L'asse con tolleranza deve essere compreso in una zona cilindrica avente diametro di 0,03, parallela all'asse di riferimento **A** (retta di riferimento).
		⊥	**Perpendicolarità** di una linea (asse) rispetto ad una superficie di riferimento			L'asse del cilindro, a cui è unito il riquadro della tolleranza, deve essere compreso tra due piani paralleli distanti 0,1 e perpendicolari alla superficie di riferimento.
		∠	**Inclinazione** di una linea (asse) rispetto ad una superficie di riferimento			L'asse del foro deve essere compreso tra due piani paralleli distanti 0,08 e inclinati di 60° rispetto alla superficie **A** (superficie di riferimento).
	Tolleranze di posizione	⌖	**Localizzazione** di una linea			L'asse del foro deve essere compreso in una zona cilindrica avente diametro 0,08 il cui asse è nella posizione teorica esatta della linea considerata rispetto alla superficie **A** e **B** (piani di riferimento).
		◎	**Concentricità o coassialità** di un asse			L'asse del cilindro, la cui linea di misura è unita al riquadro della tolleranza, deve essere compreso in una zona cilindrica avente diametro di 0,08 coassiale all'asse di riferimento **A-B**.
		⌯	**Simmetria** di un piano mediano			Il piano mediano della scanalatura deve essere compreso tra due piani paralleli distanti 0,08 e disposti simmetricamente al piano mediano di riferimento **A**.
	Tolleranze di oscillazione	↗	**Oscillazione circolare** radiale			L'oscillazione radiale non deve essere maggiore di 0,1 in ogni piano di misura durante una rotazione completa attorno all'asse di riferimento **A-B**.
		⌰	**Oscillazione totale** radiale			L'oscillazione totale radiale non deve essere maggiore di 0,1 in ogni punto della superficie considerata durante più rotazioni attorno all'asse di riferimento **A-B**, con uno spostamento assiale relativo tra pezzo e strumento di misura. Lo spostamento deve avvenire lungo una linea avente la forma teoricamente esatta del contorno e disposta in posizione corretta rispetto all'asse di riferimento.

Tabella 4.1 Tolleranze geometriche di forma e posizione

4.1 Tolleranza di parallelismo assi dei fori piede e testa biella

La tolleranza geometrica di parallelismo che è presente tra piede e testa di biella con riferimento sulla testa impone che l'asse dove è presente la tolleranza, cioè quello di piede, deve essere compreso in una zona di tolleranza identificata da un cilindro di diametro Ø 0.03mm.

Questa è una tolleranza di orientamento perché stabilisce i limiti di variabilità, che in questo caso è il diametro del cilindro, di un elemento geometrico come l'asse del foro rispetto ad un altro riferimento, che nel nostro caso è l'asse del foro di testa. Di conseguenza la zona di tolleranza cilindrica è perfettamente parallela all'asse del foro di testa.

In questo modo si garantisce un certo grado di parallelismo, che in questo caso è di buona precisione, tra i due assi dei fori. Questa tolleranza geometrica è molto importante per il funzionamento e la durata nel tempo del componente stesso e dei componenti ad esso collegati.

4.2 Tolleranza di parallelismo tra due piani

Questo tipo di tolleranza indica il parallelismo di una superficie rispetto ad un'altra superficie. In questo caso le superfici non sono le facce laterali della biella in quanto testa fusto e piede non appartengono esternamente allo stesso piano, ma si prendono in considerazione due piani che distano, da ambedue le parti della mezzeria della biella, 60mm.

I due piani devono stare all'interno della zona di tolleranza che in questo caso è molto grande per la precisione dei macchinari utilizzati e complessivamente è 0.30mm. Con questa tolleranza si limita una zona distante per l'appunto 0.30mm creata da due piani che a loro volta sono paralleli al piano di riferimento e contengono il piano campionato dalla misura.

Questa tolleranza serve ad evitare una biella con i due piani laterali non paralleli tra loro e mantenere così una adeguata linearità del fusto, della testa e del piede di biella per un corretto funzionamento del componente.

Capitolo 5

Descrizione processo produzione biella

Il ciclo produttivo, cioè l'intreccio di trasformazioni, in successione o combinate fra loro, per ottenere un prodotto finito, si sviluppa di solito con la stessa sequenza. In dipendenza dei requisiti può essere sufficiente percorrere anche solo alcune tappe di questa sequenza; in altri casi si procede con numerose lavorazioni, anche ripetute più volte, dettate dalla necessità di conseguire specifiche prestazioni funzionali ed estetiche. È quindi possibile utilizzare un criterio sistematico e collocare in modo univoco i processi di trasformazione: le tecniche di lavorazione per produrre un manufatto metallico di forma definita e stabile possono essere raggruppate e classificate con riferimento al criterio per realizzare la coesione. Questa è intesa sia degli atomi di un corpo solido, sia come coesione di più elementi che formano un assieme unico. Questo metodo di classificazione può essere esteso e utilizzato anche per tutte le altre categorie di materiali, dai polimerici ai ceramici o vetri etc. Il ciclo di lavorazione e le tecnologie metallurgiche con la necessità di conseguire specifici requisiti dimensionali e prestazionali fanno sì che il processo e la tecnologia siano strettamente legate.

Nel ripercorrere la sequenza di lavorazioni condotte con i materiali metallici è opportuno sottolineare la significativa evoluzione che è stata conseguita per le prestazioni meccaniche, attraverso l'introduzione di nuove tecnologie o perfezionando la conduzione di specifiche fasi.

Le proprietà meccaniche (resistenza a rottura e allo snervamento) sono migliorate innanzitutto in fase di alligazione, conducendo un'opportuna affinazione delle leghe Tabella 5.1, basti pensare ai notevoli miglioramenti ottenuti con gli acciai di qualità. I metalli puri, a parte per una trascurabile presenza di impurezze, sono destinati a impieghi dove risulta fondamentale per le lavorazioni un'elevata deformabilità del materiale come per esempio imbutitura o trafilatura, o per le proprietà fisiche di conduzione elettrica o calore.

	Metalli				
	Fe	Cu	Al	Mg	Ti
Rm (MPa) metallo puro	400	235	76	152	275
Rm (MPa) delle leghe	1800	860	505	380	1500

Tabella 5.1 Miglioramento dello sforzo a rottura prima e dopo l'alligazione

5.1 Caratteristiche acciaio 16NiCrMo2

Gli acciai da cementazione sono impiegati soprattutto per la realizzazione di pezzi che da un lato richiedono elevata durezza superficiale per resistere a condizioni di usura e, dall'altro, devono possedere adeguata tenacità a cuore per resistere alle sollecitazioni meccaniche.

In questi acciai, la durezza dello strato superficiale è ottenuta tramite il trattamento termochimico di cementazione, che lo arricchisce di carbonio (carbocementazione), e da un successivo trattamento termico di tempra diretta dalla temperatura di cementazione o da una temperatura di poco inferiore a questa, oppure ancora da un ciclo più complesso di doppia tempra, da preferirsi però nel caso di oggetti di medie o grosse dimensioni e nei casi in cui si richiedano alta affidabilità e elevata qualità del prodotto. Infine, si esegue un rinvenimento a bassa temperatura, più propriamente una distensione tra i 150 e i 200 °C (temperatura tipica 180 °C) che, pur riducendo gli sforzi interni e l'eccessiva fragilità, non altera significativamente le proprietà elevate di durezza superficiale conferite dalla tempra. La tenacità a cuore è innanzitutto assicurata da un basso contenuto di carbonio che per questi acciai è, in genere, inferiore allo 0.2%; proprio per questo motivo l'acciaio prescelto ha un livello medio di carbonio dello 0.16%. Dopo cementazione seguita da tempra e distensione, si ottiene uno strato superficiale con durezze intorno a 63 HRC, nella testa di biella è infatti prescritta una durezza di 60 HRC, congrua con il trattamento. La resilienza a cuore è molto elevata, fino a 35 KCU e la resistenza a trazione arriva fino a 1570 MPa (per acciai legati come il 16NiCrMo2).

Questa tipologia di acciai legati presenta una elevata resistenza alla trazione e temprabilità, che rende possibile ricorrere a mezzi di tempra meno drastici come il bagno di olio.

Più il tenore di nichel è elevato più si hanno elevati valori di tenacità, nelle condizioni di carico gravoso e negli spessori maggiori, inoltre si aumenta la temprabilità dell'oggetto.

Il cromo e il molibdeno servono per aumentare la temprabilità dell'acciaio e per stabilizzare i carburi che si formano nel processo.

5.2 Tecnologie di lavorazione meccanica

I principali processi di fonderia per la creazione della biella in acciaio sono la formatura con colata in conchiglia o forme da demolire oppure per deformazione attraverso lo stampaggio per compressione di una billetta o blumo.

La formatura (foggiatura) di un metallo allo stato liquido è realizzata tramite solidificazione, avvalendosi di diverse tecniche di colata, con le quali si ottengono forme sostanzialmente definitive attraverso l'attività di fonderia: colata in forma, colata in conchiglia che poi possono venire deformate.

5.2.1 Colata

Le fonderie si suddividono fra quelle in cui il metallo è fatto solidificare dentro forme temporanee, realizzate con materiali refrattari in forme a perdere, utilizzate una sola volta e demolite al momento dell'estrazione del getto, oppure in forme permanenti come stampi metallici utilizzati per produrre una grande quantità di getti. Le prime si utilizzano nel caso di metalli a elevata temperatura di fusione, quali acciaio, ghisa, bronzo e alluminio, mentre di solito le forme permanenti sono subordinate in primis alla temperatura di fusione del metallo che per un acciaio legato come il 16 NiCrMo2 è attorno ai 1600 °C e sono per questo utilizzati soprattutto nel campo dei materiali non ferrosi.

La fase di fusione del metallo è basilare alla scelta del processo e dell'impianto, che dipendono principalmente dalla drasticità, cioè dalla richiesta di calore nella fase di fusione, e dalla necessità di dover condurre, in funzione del rottame caricato, operazioni metallurgiche di riduzione. Con questa operazione, cariche allo stato solido sono fuse e riscaldate alla temperatura di colata in genere attraverso forni ad arco elettrico per gli acciai.

Durante la fase di modelleria, si procede alla preparazione dei modelli che riproducono i getti che sono utilizzati per dare l'impronta alle forme che accolgono il metallo e alle anime, realizzate in animisteria, che posizionate all'interno dello stampo creano le cavità. Vengono utilizzati modelli in materiale plastico espanso per piccole serie in modo da aumentare l'economicità delle stampate, modelli in legno per produzioni di piccola-media serie di getti per i quali non sono richiesti elevati standard dimensionali, modelli di metallo realizzati per asportazione di truciolo o elettroerosione per getti di media-grande serie.

Durante l'operazione di formatura, nel caso di forme temporanee, si procede alla preparazione dello stampo, cioè della forma cava di materiale refrattario con le anime in aggiunta per creare le cavità nel getto, che servirà per la colata del metallo. Lo stampo si ottiene mediante l'impronta, sia il contenimento e la solidificazione del metallo. Si utilizzano forme aggregate con materiale minerale nella formatura a verde, risultante dall'agglomerazione di sabbia, bentonite, nero minerale e acqua, oppure sabbie aggregate mediante resine o silicati, nella formatura con leganti organici o inorganici. Nella formatura shell-moulding si usano, invece, resine organiche che è possibile predisporre in forme a guscio. Altre tecniche di formatura prevedono l'utilizzo di forme realizzate in materiale polimerico espanso che evapora all'inserimento della lega fusa, oppure

l'impiego di forme in cera della cosiddetta colata a cera persa che permette di creare getti con elevata finitura superficiale tipiche delle opere d'arte, opere odontoiatriche, gioielleria.

I getti in conchiglia avvengono colando per gravità un metallo o lega a bassa temperatura di fusione, in forme permanenti in acciaio, con l'utilizzo di agenti distaccanti applicati sulla superficie per evitare l'incollaggio del getto allo stampo. Rispetto ai getti in sabbia la velocità di solidificazione è maggiore e la precisione e la finitura della superficie è migliore.

In base alle modalità con cui il metallo fuso viene introdotto nella forma e alle condizioni con le quali viene fatto solidificare, si distinguono diverse tecniche di colata. Nella procedura tradizionale di colata per gravità, il metallo è versato direttamente nella forma. Nella pressofusione il metallo è iniettato attraverso la pressione applicata da un pistone o aria compressa nella camera di compressione, si crea un grano fine e superficie che rispetta ottime tolleranze di rugosità superficiale e di forma.

All'atto della solidificazione quasi tutte le leghe subiscono una diminuzione di volume che deve essere compensata con particolari accorgimenti. Si realizzano per questo delle materozze la cui funzione è quella di serbatoio che alimenta il getto durante la solidificazione.

A solidificazione avvenuta si procede alle operazioni di disfattura e finitura. Il getto viene estratto dalla staffa di contenimento e dalla terra circostante. Normalmente questa operazione viene effettuata con sistemi di espulsione in una griglia vibrante. La terra è raccolta con nastri sottostanti il distaffatore e convogliata alla rigenerazione, dove avviene la rottura delle zolle, la separazione delle parti metalliche e dei residui delle anime e la vagliatura per il successivo reimpiego. I residui di terra grossolani sono eliminati attraverso una granigliatura.

Si procede quindi al distacco dei canali di afflusso del metallo al getto e delle materozze, operazione che si chiama smaterozzatura.

5.2.2 Deformazione plastica

Per deformazione si intende un processo mediante il quale si modifica permanentemente la forma di un corpo solido, mantenendo costante la massa e conservando la coesione del materiale. I processi sono distinti in base al tipo di sollecitazione applicata e possono essere trazione, compressione, flessione. Le lavorazioni possono essere condotte dopo riscaldamento del materiale (deformazioni a caldo) o senza riscaldamento preventivo del pezzo (deformazioni a freddo) e possono essere eseguite in diversi momenti nel corso del ciclo di produzione.

La duttilità della maggior parte dei materiali metallici consente di modificare la forma mediante l'applicazione di forze esterne. La prima lavorazione generalmente subita dai semilavorati è un processo di deformazione plastica a caldo effettuato dopo riscaldo del materiale a temperature superiori alla metà della temperatura di fusione, per assicurare una più elevata duttilità del materiale e consentire una riduzione della potenza richiesta. Questa deformazione non ha soltanto lo scopo di modificare convenientemente la forma iniziale ma anche quello di natura metallurgica di affinamento della struttura grossolana di solidificazione e di eliminare sfavorevoli distribuzioni di microcostituenti, migliorando il complesso delle proprietà meccaniche del materiale. Le lavorazioni plastiche a caldo non permettono di ottenere elevate qualità superficiali

a causa di fenomeni di ossidazione legati all'alta temperatura. In questi casi si fa seguire una deformazione plastica a freddo a temperatura ambiente. Una lavorazione per deformazione a freddo è necessaria anche quando si intende innalzare le caratteristiche meccaniche del materiale mediante incrudimento.

L'entità delle deformazioni realizzabili durante la lavorazione plastica dipende non solo dal materiale, ma anche dallo stato di tensione cui è sottoposto. Se questo è sostanzialmente di compressione, si possono realizzare grandi deformazioni anche in materiali relativamente poco duttili.

I processi di deformazione plastica classificati, escludendo quelli che risultano da combinazioni di lavorazioni diverse sono oltre 200 e si suddividono in base al tipo di sollecitazione che provoca la deformazione. Per la produzione di una biella per deformazione plastica si usa una forgiatura (stampaggio). Questo processo agisce con una forza dinamica, per l'applicazione di un maglio, o graduale, per l'azione di una pressa, cioè differenziata in base alla velocità di applicazione, si imprime una forma diversa da quella iniziale a un massello preriscaldato. Si possono ottenere pezzi di forma complessa con proprietà migliori di pezzi della stessa forma ottenuti per solidificazione dei getti. Lo stampaggio è una forgiatura a stampo chiuso, cioè con l'impiego di specifiche attrezzature (stampi) che riproducono la forma del pezzo, al fine di imprimere al materiale caldo una forma ben definita, dimensionalmente costante e con una superficie abbastanza liscia e uniforme. A volte si utilizza una successione di stampi via via più simili alla forma finale.

5.2.3 Sinterizzazione

Un' altra tecnica più evoluta è la formatura di materiale allo stato solido (polveri) dove avviene una pressatura in stampo di polveri metalliche (stampaggio per iniezione, stampaggio per compressione). Le polveri metalliche di elevata purezza sono ottenute con processi chimici, processi di frantumazione oppure polverizzazione allo stato liquido, sono compattate sotto pressione, eventualmente aggiungendo opportuni leganti, in stampi dalla geometria spesso complessa, dei quali assumono la forma. Poi, allo scopo di costituire una struttura resistente, si esegue un trattamento di sinterizzazione a una temperatura inferiore a quella di fusione. Infine, si procede a successive lavorazioni alle macchine utensili o a eventuali trattamenti termici. La metallurgia delle polveri presenta molti dei vantaggi della fonderia, ma minore formazione di difetti e può essere utilizzata anche con metalli e leghe difficilmente colabili per via tradizionale.

5.2.4 Lavorazione dal pieno

La biella in questione può essere ricavata anche a partire da una lastra di acciaio 16NiCrMo2, per esempio tagliata ad acqua per creare un semilavorato. Si perde la qualità dei forgiati che se studiati attentamente possono creare una direzione prevalente per le fibre del materiale, ma in questo caso servono degli stampi che aumentano i costi e dilatano i tempi per la creazione del primo pezzo, più adatti ad una grande produzione. Se i numeri di produzione sono molto modesti, come accade nel caso dei prototipi e dei mezzi da competizione, per non parlare delle difficoltà

che si incontrerebbero qualora fosse necessario apportare delle modifiche al progetto, è conveniente produrre la biella ricavandola dal pieno attraverso macchine CNC.

5.3 Trattamenti termici

5.3.1 Cementazione

Il trattamento di cementazione, o meglio di carbo-cementazione, si basa sull'osservazione che doti di elevata durezza si possono ottenere mediante tempra e rinvenimento a bassa temperatura su acciai ad alto contenuto di carbonio, mentre doti di alta tenacità, sono proprie di acciai a medio basso contenuto di carbonio temprati e rinvenuti ad alta temperatura. La cementazione, infatti, consiste nel mettere a contatto un acciaio, con tenore di carbonio di circa lo 0.2% come nel nostro caso, con un'atmosfera cosiddetta carburante, in modo da arricchirne lo strato più interno di materiale, fino a concentrazioni di questo elemento di circa lo 0,8%. L'acciaio è sottoposto, infine, ad un ciclo complesso di trattamento termico: tipica è la singola o doppia tempra seguita da una distensione, che realizza una struttura di martensite rinvenuta a bassa temperatura, nello strato esterno, mentre nello strato interno del pezzo si ha acciaio rinvenuto.

Nella pratica per cementare la biella in esame si utilizza la tecnica della cementazione gassosa, l'acciaio è posto ad alta temperatura, circa 900 °C, in un ambiente ricco di monossido di carbonio CO, per 3-4 ore, che in queste condizioni si dissocia, sulla superficie del metallo, in carbonio elementare e anidride carbonica secondo la reazione, catalizzata dal metallo stesso

$$2CO_{(g)} \leftrightarrow C + CO_2$$

La miscela gassosa è costituita da ossido di carbonio, generato per combustione parziale di metano, gas naturale e carbone di legna, da idrocarburi, specialmente metano e propano e da altri gas a azione riducente, come l'idrogeno, o inerti come l'azoto. L' azione fondamentale è svolta dall'ossido di carbonio; gli idrocarburi, con una reazione di pirolisi, contribuiscono fornendo carbonio finemente suddiviso. La miscela gassosa deve essere sottoposta ad un controllo attento per bilanciare l'azione decarburante dell'anidride carbonica, dell'idrogeno e soprattutto dell'acqua che è sempre presente.

Il carbonio elementare che si forma sulla superficie metallica penetra per diffusione nello strato superficiale dell'acciaio arricchendolo. Il processo è realizzato sopra A_3 in modo che l'alta temperatura permetta una diffusone rapida del carbonio nella matrice dell'acciaio, mentre l'arricchimento del metallo è reso più agevole dalla maggiore solubilità del carbonio del Fe-ɣ. Lo spessore dello strato interessato Figura 5.1, dipende in primo luogo dalla temperatura e dalla durata del trattamento Figura 5.2. Nei processi di cementazione ordinari, per i tempi di solito adottati, si ottengono spessori dello strato indurito tra 0.1 e 1 mm.

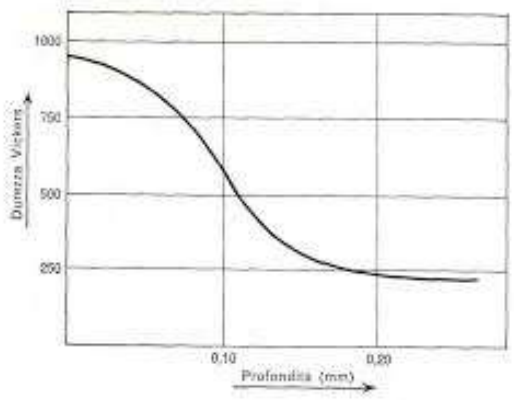


Figura 5.1 Andamento medio della durezza nello spessore per un acciaio legato, cementato e temprato

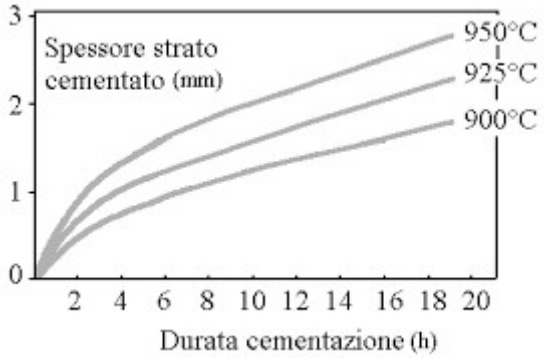


Figura 5.2 Influenza del tempo e della temperatura sulla profondità di cementazione (andamento previsto in base alla relazione di Harris)

Nella biella è specificato uno strato di cementazione di 1 mm con annesso campo di tolleranza solo sulla testa di biella. Questo vuol dire che le altre parti possono essere cementate come la testa di biella, cioè restare nell'ambiente ricco di carbonio per lo stesso tempo, oppure venire cementate per un tempo minore o non essere del tutto cementate attraverso la deposizione sulla superficie di uno strato di rame dell'ordine dei 75-100 µm oppure con uno strato di argilla e amianto che viene essiccato, nel quale il carbonio non è solubile.

La cementazione gassosa viene sempre di più applicata nelle produzioni in serie di pezzi di piccole e medie dimensioni, trattandosi di un procedimento veloce e controllabile, nonostante richieda un impianto più costoso.

5.3.2 Tempra

Al termine della cementazione, l'acciaio ha proprietà scadenti dovute all'eccessivo ingrossamento del grano austenitico, durante la prolungata permanenza ad alta temperatura. Per ottenere le proprietà di durezza in superficie, senza eccessiva fragilità, e di tenacità al cuore è necessario seguire un trattamento termico di tempra condotto in modo da tener conto che, poiché l'acciaio presenta un cuore a basso tenore di carbonio e uno strato di carbonio superficiale attorno allo 0.8%, la temperatura di austenitizzazione è minore di quella del cuore Figura 5.3.

Si procede mediante doppia tempra: il pezzo cementato è sottoposto ad una prima tempra riscaldando fino ad A_3 del cuore, mantenendolo a questa temperatura il tempo necessario a trasformare completamente la struttura ferritico-perlitica in una struttura austenitica a grani fini, e temprandolo infine, in acqua o in olio così da ottenere a cuore una struttura martensitica. Poiché la temperatura in questa prima tempra è molto più alta di quella propria dello strato esterno ricco di carbonio, in questa prima fase del trattamento si ha un eccessivo ingrossamento del grano austenitico della zona cementata; il rapido raffreddamento successivo porta alla formazione, in questa zona, di una martensite grossolana e troppo fragile.

Con la seconda tempra si ottiene l'affinamento del grano dello strato cementato. A questo scopo il pezzo è riscaldato alla temperatura di austenitizzazione dello strato cementato, che è più bassa rispetto a quella del cuore, mantenuto a questa temperatura per il breve periodo di trasformazione della martensite grossolana in austenite a grano fine e, infine, temprato in acqua o olio così da ottenere, nello strato cementato, una martensite fine.

Durante questa seconda tempra, la martensite presente nel cuore del pezzo, formatasi in precedenza nella prima tempra, è rinvenuta sopra la temperatura eutettoidica A_1 , per cui tende a trasformarsi in una struttura austenitica dispersa in una matrice ferritica. Durante la seconda tempra il cuore tende così a trasformarsi in una struttura essenzialmente di martensite in una matrice ferritica, con presenza di strutture di rinvenimento ad alta temperatura della martensite della prima tempra, se queste non hanno avuto modo di trasformarsi completamente in austenite e ferrite, con una struttura che mantiene comunque adeguate caratteristiche meccaniche e di tenacità.

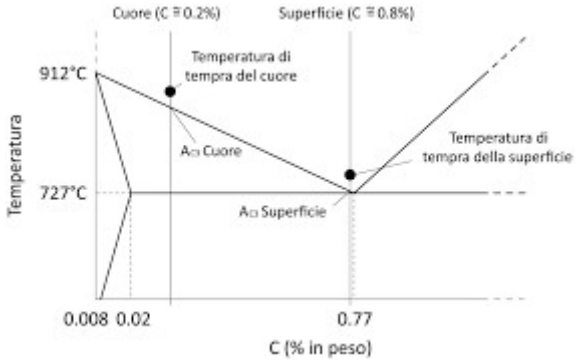


Figura 5.3 Schematizzazione delle condizioni del trattamento termico dopo cementazione

Negli acciai cementati le due tempre successive garantiscono le migliori proprietà, nella pratica non sono sempre eseguite a causa del doppio costo rispetto ad una tempra singola.

Si può procedere quindi con una tempra diretta dalla temperatura di cementazione, nel caso, per esempio, di acciai con elementi in lega che possono ostacolare l'accrescimento del grano austenitico come il Cr nel nostro caso, che però non è presente in significativa percentuale.

Il trattamento di tempra induce sforzi interni rilevanti, che possono portare a deformazioni e addirittura alla rottura dei pezzi o alla formazione di cricche da tempra, Figura 5.4, che possono costituire un problema del tutto non trascurabile quando la biella è in esercizio. Queste rotture sono dovute al fatto che, durante il raffreddamento dei pezzi soprattutto in caso di tempra diretta, la parte esterna della biella attraversa l'orizzontale della trasformazione martensitica prima del cuore del pezzo. Il cuore quindi prende tempra in ritardo rispetto alla superficie. Si ha un aumento di volume istantaneo con la trasformazione dell'austenite in martensite che va in contrasto lo strato superficiale che si è già trasformato in martensite ed è quindi indurito e fragile. Si creano quindi sforzi di trazione sulla superficie e di compressione all'interno del materiale che in alcuni casi possono indurre a deformazioni o nel peggiore dei casi a fratture nelle zone esterne.

Proprio per questo motivo è importante scegliere il mezzo di tempra in modo che sia il meno drastico possibile, compatibile però con il raggiungimento di una struttura martensitica. La scelta dipende dalla temprabilità intrinseca dell'acciaio e dalle dimensioni dell'oggetto.

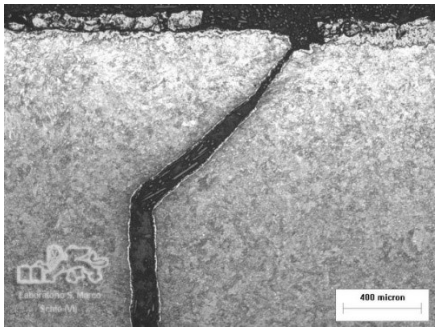


Figura 5.4 Cricca da tempra su forgiato

5.3.3 Rinvenimento

Il principale scopo del rinvenimento è la modifica della struttura martensitica degli acciai sottoposti a tempra. La martensite, infatti, è dura e molto resistente a trazione ma troppo fragile per l'applicazione in un organo meccanico come una biella che è sottoposto a flessioni trazioni e compressioni combinate e cicliche. Tale trattamento, inoltre, ha effetto sull'eventuale austenite residua presente, che può essere presente in una trasformazione martensitica parziale ed anche sugli sforzi interni che si creano successivamente alla tempra.

Il rinvenimento consiste nel riscaldare l'oggetto di acciaio, successivamente alla tempra, ad una temperatura, in genere, non superiore ai 600-650 °C, in ogni caso inferiore ad A_1 , nel mantenimento a tale temperatura per un tempo necessario e poi in un raffreddamento generalmente fatto in aria. L'entità degli effetti ottenuti, diminuzione della durezza e contemporaneo aumento della tenacità e della duttilità dell'acciaio, è funzione della temperatura di rinvenimento, della durata del trattamento e della composizione dell'acciaio. I risultati sono tanto più marcati ovviamente quanto più è alta la temperatura di rinvenimento e più lungo è il tempo di trattamento. Nel corso del trattamento si possono individuare vari stadi durante i quali la martensite si trasforma in strutture più stabili. Tali stadi si succedono progressivamente all'aumentare della temperatura e del tempo del trattamento. Tra 100 e 250°C si ha solo un effetto di distensione del materiale con una riduzione degli sforzi interni. Fino a 300 °C l'austenite presente si converte in bainite. In questo caso la durezza può aumentare proporzionalmente alla bainite formata. Tra 300 e 400 °C la martensite perde completamente la sua tetragonalità trasformandosi in ferrite, questa trasformazione provoca una più evidente riduzione della durezza e un miglioramento della duttilità dell'acciaio. Tra i 450 e i 600°C le particelle di cementite si accrescono diventando visibili tranquillamente al microscopio ottico. Oltre i 600-650 °C per un riscaldamento prolungato si ha la completa ricristallizzazione della ferrite.

In seguito a questi processi, durante il rinvenimento, la microstruttura si modifica passando dalla martensite ad una microstruttura formata da laminette fini di ferrite e cementite (troostite) tra i 250 e 400°C, mentre tra 400 e 600 °C si forma una microstruttura formata da cementite finemente dispersa in una matrice ferritica (sorbite).

Per la produzione della biella trattata il rinvenimento viene usato per aumentare la duttilità della biella senza perdere le qualità di durezza acquistate con la tempra, in quanto è un componente sottoposto a numerose sollecitazioni che se fosse troppo fragile arriverebbe subito a rottura. Per non perdere tutte le caratteristiche guadagnate dalla tempra non bisogna entrare nel campo dei 600-650 °C che comporterebbe una ricristallizzazione, ma restare nel campo 400-450 °C per guadagnare duttilità senza comunque perdere troppa durezza.

5.4 Scelta del mezzo di tempra

La scelta del mezzo di tempra può essere fatta a partire dalla curva Jominy dell'acciaio. Da questa si ricava la massima distanza in corrispondenza della quale il materiale assume la durezza voluta. Dalla dimensione o forma del pezzo si stima, poi, il massimo diametro equivalente dell'acciaio che definisce la profondità di tempra necessaria. Individuate queste due grandezze, tramite curve di correlazione come quelle di Figura 5.5, si stima l'indice di drasticità necessario per il raffreddamento e, quindi, il mezzo di tempra, Tabella 5.2.

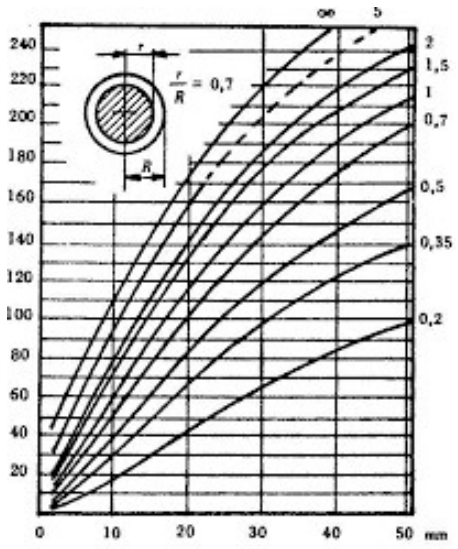


Figura 5.5 Correlazione tra distanza di tempra ottenuta dalla curva Jominy e diametro equivalente di tempra per immersione completa del pezzo, in funzione della drasticità del mezzo di tempra.

Agitazione	Mezzo temprante			
	Aria	olio	acqua	salamoia
nessuna	0.02	0.25-0.30	0.9-1.0	2
leggera	-	0.30-0.35	1.0-1.1	2-2.2
moderata	-	0.35-0.40	1.2-1.3	-
buona	-	0.40-0.50	1.4-1.5	-
forte	0.05	0.50-0.80	1.6-2.0	-
violenta	-	0.80-1.10	4	5

Tabella 5.2 Valori tipici dell'indice di drasticità dei mezzi di tempra

5.5 Lavorazioni di finitura

5.5.1 Rettifica

Le rettificatrici sono macchine utensili utilizzate per la finitura di pezzi metallici; sono in grado di ottenere un'ottima precisione dimensionale e geometrica, con bassissima rugosità (Ra < 0.8 µm). Con l'operazione di rettificatura si lavorano anche materiali di elevata durezza superficiale, come acciai temprati o come in questo caso anche carbocementati.

L'utensile è una mola, formata da abrasivi agglomerati, di forma adatta all'oggetto da lavorare (disco, tazza, coltello ecc.). La velocità di rotazione della mola abrasiva deve essere quella prescritta dal costruttore poiché una velocità di taglio troppo bassa provoca un'usura anomala e un basso rendimento della lavorazione. Una velocità troppo elevata, invece, determina una scarsa azione abrasiva e un pericolo di rottura dovuto all'azione della forza centrifuga.

Le rettificatrici sono classificate in varie classi in base al loro funzionamento e agli oggetti che possono lavorare, nel nostro caso specifico si utilizza o una rettificatrice universale o una in tondo per interni in quanto va rettificato il foro di testa.

Le universali sono macchine in grado di fare qualsiasi tipo di rettifica su qualsiasi piano. Sono adatte per le piccole produzioni, per lavori di attrezzeria o manutenzione.

Le rettifiche in tondo per interni consentono la rettifica di fori cilindrici o conici e possono essere dotate di attrezzature per la produzione in serie. Si possono individuare due tipologie di rettificatrici molto differenti ma che appartengono alla stessa categoria: quelle in cui il pezzo e la mola ruotano e quelle in cui il pezzo da lavorare è fermo e la mola possiede moto di taglio, moto di alimentazione radiale e assiale e un moto planetario di rotazione attorno all'asse del foro. È una macchina adatta alla lavorazione di pezzi asimmetrici che creerebbero, se posti in rotazione, delle vibrazioni a causa della forza centrifuga.

5.5.2 Lappatura

La lappatura è una lavorazione che permette di ottenere finiture superficiali elevatissime (Ra < 0.1µm). Si esegue utilizzando polveri abrasive, di grana finissima e omogenea, in sospensione in un fluido.

In Figura 5.6 è indicato il sistema di lavoro di una lappatrice per piani. Il pezzo è montato, possibilmente eccentricamente, tra due dischi o piastre controrotanti in ghisa che, essendo tenera, è in grado di trattenere i grani abrasivi addotti da fluido.

Cambiando la forma dell'elemento lapidatore si possono ottenere lappatrici per cilindri interni ed esterni, anelli ecc. Il sistema di funzionamento è sempre lo stesso.

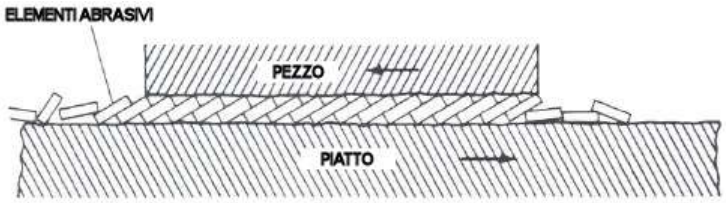


Figura 5.6 Sistema di funzionamento di una lappatrice

5.6 Trattamento termico di distensione

Il rinvenimento di distensione si applica agli acciai temprati e consiste, generalmente, nel riscaldare il pezzo ad una temperatura tra i 150 e i 200 °C. In questo caso si effettua una bollitura in olio tra i 180 e i 200 °C per una durata di 4 ore.

Il raffreddamento può essere più o meno lento a seconda delle caratteristiche che si vogliono ottenere. Lo scopo di questo trattamento è quello di ridurre sensibilmente le tensioni interne del materiale derivanti dal trattamento termico di tempra, aumentando la tenacità, senza tuttavia diminuire sensibilmente la durezza.

Capitolo 6

Durezza da raggiungere dopo i trattamenti termici

La testa di biella deve possedere determinate caratteristiche di durezza che vengono acquisite superficialmente dal materiale dopo il trattamento di cementazione. Aumentare la durezza dell'occhio di biella serve per aumentare la durata della sede nel contatto tra l'acciaio della biella e il cuscinetto, in questo caso una rulliera. La durezza di un materiale è definita come la resistenza alla penetrazione da parte di un altro corpo (più duro) o alla scalfitura. Fermo restando alla definizione generale, assume diversi significati secondo il tipo di materiale e dello scopo per il quale tale misura è eseguita. Per materiali di uso industriale, la durezza rappresenta la resistenza alla deformazione plastica permanente: è quindi un indice della resistenza del materiale alle sollecitazioni, legato direttamente al carico di snervamento. Questo legame diretto non è semplice a causa delle limitazioni di misura sperimentale collegate alla prova; il valore della durezza può essere collegato in modo empirico al carico di rottura. La prova di durezza deve essere eseguita seguendo una procedura rigida, definita dalle norme, per assicurare una sufficiente riproducibilità della misura. L'importanza pratica risiede, oltre che nella semplicità e rapidità della sua esecuzione, anche nel fatto che è l'unica prova meccanica non distruttiva e come tale l'unica che può essere impiegata in sede di controllo della struttura, come nel nostro caso, dopo l'applicazione di trattamenti termici e cicli di lavorazione. La misura della durezza può essere eseguita secondo metodi che si differenziano per il principio di misura, la procedura di esecuzione, la forma e la natura del penetratore Figura 6.1. La misura deve essere fatta direttamente, secondo le prescrizioni previste per il particolare tipo di durezza, e non può essere ottenuta per conversione da misure effettuate con un metodo diverso.

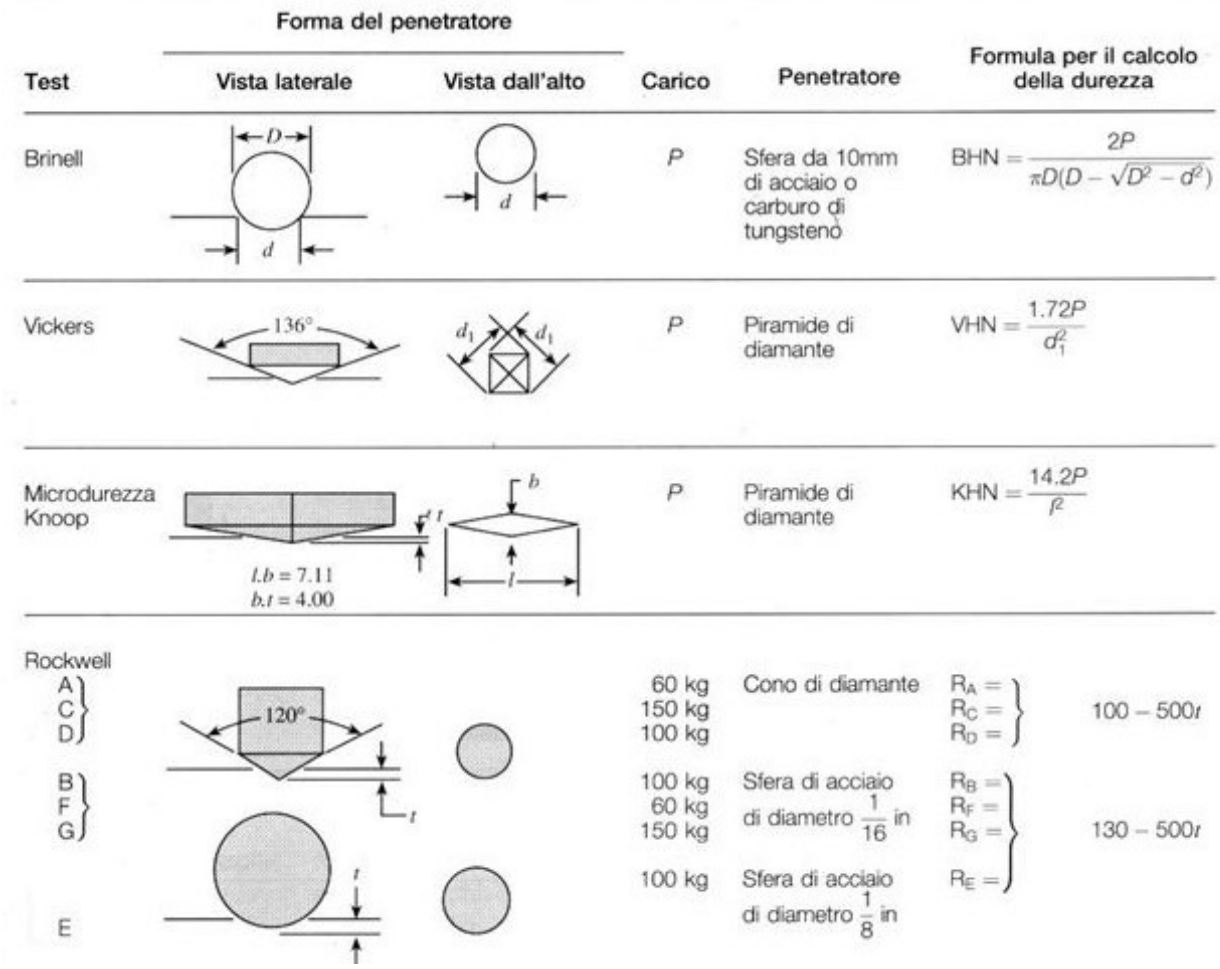


Figura 6.1 Principali caratteristiche delle prove di durezza

6.1 Prova di durezza Rockwell

La prova di durezza Rockwell è la prova eseguita nella testa della biella e in generale la prova più eseguita; la sua diffusione è dovuta alla rapidità e facilità di esecuzione, alla capacità di diversificare acciai con durezza di poco differente, alla piccola dimensione lasciata dall'impronta, tanto che può essere effettuata anche su pezzi finiti. La durezza è stimata dalla misura della profondità cui si porta il penetratore quando viene applicato il carico, in base a differenti scale convenzionali.

Durante le prove si applica inizialmente un precarico di 10 kg; in questo modo, si riduce la necessità di un'accurata finitura superficiale e si eliminano creste o affossamenti sulla superficie a contatto con il penetratore. Successivamente, si aumenta il carico che viene mantenuto per un certo tempo. Poi, una volta rimosso il carico e lasciato il precarico, la profondità di penetrazione è automaticamente registrata su un apposito quadrante che indica direttamente il valore di durezza Rockwell. Nel nostro caso viene usato il penetratore C cioè un cono di diamante con angolo al vertice di 120° e per gli acciai temprati un carico di 150 kg. L' intervallo significativo di misura è tra 20 e 70 HRC, sulla superficie difatti è richiesta una durezza di 60 HRC.

Capitolo 7

Progettazione di massima della biella veloce per motore endotermico

La biella e l'albero motore sono gli organi meccanicamente più sollecitati nei motori a scoppio veloci, siano essi a ciclo Diesel oppure Otto. Un loro cedimento comporta danni gravissimi al motore, quindi si è solitamente restii e molto cauti nella modifica di uno di questi componenti. Tuttavia a volte è indispensabile una nuova progettazione per rispondere a mutate esigenze in termini di carichi o semplicemente per poter adottare un componente più leggero.
La biella in produzione è ricavata per stampaggio in acciaio legato 16NiCrMo2.

7.1 Le masse

Il primo problema da affrontare è quello della schematizzazione della massa della biella per calcolare gli sforzi dovuti alle forze d'inerzia: infatti l'accelerazione è diversa per ogni punto della biella e analiticamente sarebbe impossibile procedere. Per questo nei testi di costruzione di macchine è riportato un metodo assai semplice, ma che è stato utilizzato per decenni, che consiste nel generare due modelli per la distribuzione della massa, il primo da utilizzare per le forze assiali, il secondo per quelle trasversali, Figura 7.1.
Per le forze d'inerzia longitudinali si concentrano i $\frac{2}{3}$ della massa totale della biella nel centro dell'occhio di biella, il restante $\frac{1}{3}$ nel centro del piede di biella; queste masse, moltiplicate per la rispettiva accelerazione, danno l'entità dello sforzo assiale nel fusto della biella e, ovviamente, lo sforzo che si ottiene è costante lungo tutto il fusto, appunto perché non si tiene in considerazione la massa distribuita lungo l'asse del fusto stesso.
Per le forze trasversali, invece, si prolunga linearmente la sezione del fusto fino ai centri di rotazione della biella. In questo modo si ottiene un'asta a sezione linearmente variabile lunga quanto l'interasse della biella, ma di massa notevolmente inferiore a quella della biella, non essendo considerate le due teste. Successivamente si moltiplica l'accelerazione in un punto per la massa della sezione in quel punto e integrando si ottengono le reazioni vincolari e quindi le azioni interne.

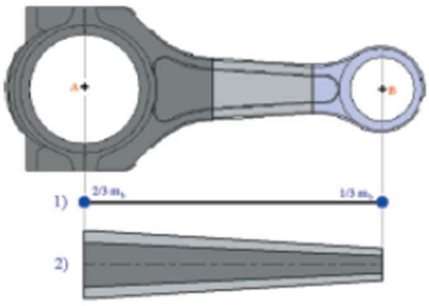


Figura 7.1 Modello di schematizzazione tradizionale di discretizzazione a concentrazione di massa utilizzato per le forze assiali

Un altro metodo diverso che dà risultati più accurati utilizzando un solo modello è quello di Figura 7.2: il fusto della biella, nella zona dove la sezione varia linearmente, resta immutato; le parti restanti, ovvero le teste, sono rappresentate da un punto materiale posizionato nel loro baricentro con massa e momento d'inerzia equivalenti.

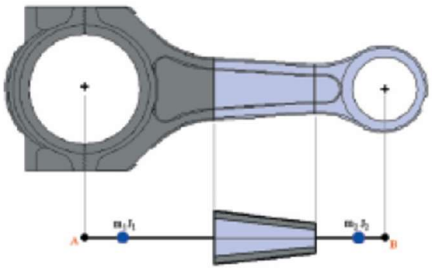


Figura 7.2 modello di schematizzazione più evoluto di discretizzazione, più preciso e unico per forze longitudinali e trasversali

Si calcola l'accelerazione in ogni punto dell'asse della biella nelle due direzioni longitudinale e trasversale, arrestandosi al primo ordine se le velocità non sono alte, oppure considerando anche le componenti del secondo ordine se si desidera maggior precisione. Alle forze d'inerzia proprie della biella bisogna anche aggiungere quelle del sistema spinotto-pistone-fasce elastiche e la forza dovuta alla pressione di combustione, valutata rispetto alla posizione angolare dell'albero a gomiti e al regime di rotazione.
A questo punto si possono integrare le forze d'inerzia per calcolare le reazioni vincolari e quindi le azioni interne. Gli integrali che si ottengono sono di semplice soluzione, ma molto ingombranti. Questo va fatto per ogni angolo di manovella e le azioni interne vanno calcolate in ogni punto dell'asse, con conseguenza un costo computazionale elevato.
I vantaggi di questo metodo sono:
- un solo modello per entrambe le direzioni delle inerzie;
- una maggior accuratezza data dal fatto che la massa delle teste che si utilizza è quella reale, invece del semplice rapporto $\frac{1}{3}$,$\frac{2}{3}$;
- l'azione assiale è variabile lungo l'asse della biella perché si tiene conto della massa distribuita del fusto;
- il valore del momento flettente generato dall'inerzia è più accurato in quanto si considera anche l'influenza della massa delle teste.

Per contro presenta:
- la necessità di conoscere baricentri, masse e momenti d'inerzia con precisione, dati resi disponibili da un modellatore solido;
- una enorme mole di calcoli e dati, che possono essere gestiti solamente con l'utilizzo di codici di calcolo automatici, per esempio attraverso Matlab.

In Figura 7.3 è riportato un andamento generico dell'azione assiale nella sezione più sollecitata. Il picco negativo indicato dalla freccia è dovuto alla pressione di combustione, che è massima in quel punto. L'altra freccia indica invece la massima forza di trazione, che si ha al punto morto superiore nella fase di incrocio. Tale forza di trazione è dovuta solo all'inerzia del sistema pistone e del piede di biella.

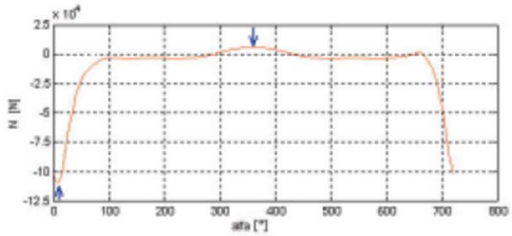


Figura 7.3 Andamento angolare dell'azione della forza assiale sul fusto della biella, nella sezione più sollecitata

In Figura 7.4 è riportato un andamento generico dell'azione assiale massima lungo il fusto della biella. La coordinata *s* indica la distanza dal bottone di manovella.
Con il metodo tradizionale non si potrebbe apprezzare questo andamento, perché l'azione assiale sarebbe risultata costante. In questo caso, essendo un caso generale, la pressione di combustione è alta e il regime di rotazione contenuto, quindi come si può notare la differenza di compressione non è significativa.

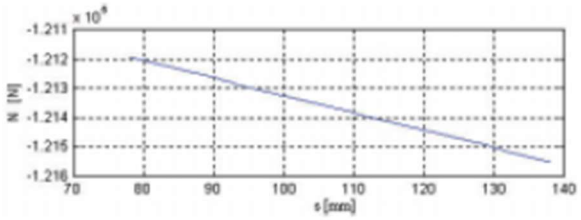


Figura 7.4 Andamento generico dello sforzo di compressione lungo il fusto di biella in funzione della distanza dal bottone di manovella

In Figura 7.5 è visualizzato l'andamento temporale del momento flettente nella zona in cui questo è massimo. Si può notare la periodicità di 360° perché il momento flettente non è influenzato dalla pressione in camera di combustione, che in un quattro tempi ha periodo di 720°, perché avviene ogni due giri dell'albero. Si possono notare le componenti di primo e secondo ordine se considerate nell'analisi.

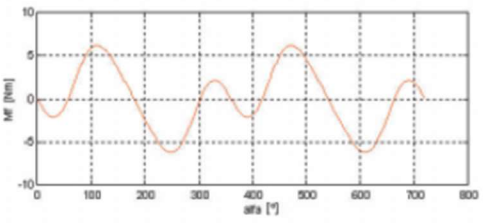


Figura 7.5 Andamento angolare del momento flettente

Per capire la differenza tra il modello più avanzato e quello tradizionale vengono confrontati i valori delle azioni interne nel caso di un motore generico.
L'azione di massima trazione valutata con il metodo più avanzato è leggermente minore, fatto da imputare ad una diversa distribuzione delle masse del piede e dell'occhio. Per l'azione di massima compressione la differenza è poco marcata, perché in questo caso influisce moltissimo la pressione di combustione, che è identica in entrambi i modelli. Il momento flettente è quello completamente diverso nei due modelli: la vistosa disparità è dovuta al fatto che il metodo tradizionale trascura completamente l'effetto della massa delle teste; infatti, la parte di queste

ultime che si trova oltre l'asse di rotazione contribuisce a ridurre il momento flettente sul fusto della biella, come è intuitivamente rappresentato in Figura 7.6.

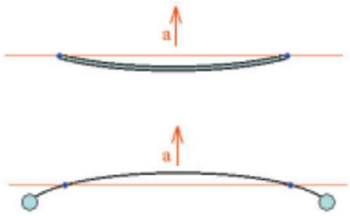


Figura 7.6 Comportamento di un'asta sottoposta ad accelerazione nel caso di due diverse distribuzioni di massa.

A questo punto si possono svolgere tutte le verifiche del caso, che sono principalmente quella a fatica e all'instabilità elastica.

7.2 Verifica a fatica

Il fusto della biella è sottoposto ciclicamente a compressione e trazione, oltre che a flessione dalle forze d'inerzia che agiscono normalmente al suo asse; le fibre esterne saranno quindi quelle che sentiranno la maggior escursione dello sforzo, essendo caricate sia dalle azioni assiali che da quelle di flessione. Una volta ricavato l'andamento dello sforzo in dette zone è sufficiente applicare i criteri della verifica a fatica, con i consueti coefficienti. Il coefficiente d'intaglio a fatica Kf può invece essere approssimato con il coefficiente d'intaglio teorico, ottenibile da un'analisi agli elementi finiti. La tensione ammissibile da adottare per il suo dimensionamento si determina sul Diagramma di Smith oppure, in calcoli di massima, adottando un grado di sicurezza elevato rispetto alla tensione di rottura (n_R= 5 ÷10).

Si devono pertanto eseguire due verifiche:

-una al carico di punta in posizione di P.M.S;

-una alla presso-flessione (colpo di frusta) in posizione di quadratura.

La verifica al carico di punta si effettua nella sezione prossima al piede di biella, assumendo come forza agente, a vantaggio di sicurezza, la forza F_{max}= p_{max}· Ac , data dal prodotto della massima pressione effettiva per l'area della sezione del cilindro.
La verifica al colpo di frusta si esegue nella sezione distante ≈ 0,6L dal piede di biella soggetta ad una sollecitazione di fatica alterna asimmetrica con σmax= – (σm+ σn) e σmin= σm.
La σm è prodotta dalla sollecitazione di flessione a cui la biella è sottoposta dalle forze di inerzia che agiscono normalmente al suo asse, distribuite con legge triangolare. La tensione di compressione σn è prodotta dalla forza Fq agente lungo la biella quando biella e manovella sono in quadratura.

7.3 Verifica all'instabilità elastica

La biella è un componente che lavora prevalentemente con un carico assiale di compressione, quindi il problema dell'instabilità è sentito: per questo le sezioni del fusto delle bielle non sono mai semplici, ma hanno quasi sempre sezione ad H.
Lo studio della biella è schematizzato con un'asta di sezione uniforme pari a quella minima del fusto, a favore di sicurezza. Per quanto riguarda i vincoli, nel piano frontale si usa un cerniera-carrello, Figura 7.7, nell'altro piano usualmente vengono utilizzati vincoli incastro-carrello oppure incastro-pattino, Figura 7.8.

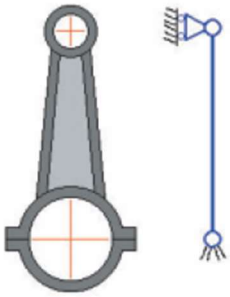


Figura 7.7 Piano frontale, vincoli cerniera-carrello

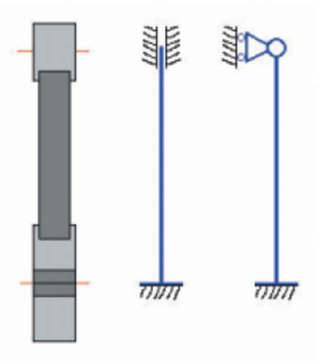


Figura 7.8 Piano laterale, vincoli incastro- carrello o incastro-pattino

Si sceglie il vincolo cerniera-carrello anche nel piano laterale quando:
- l'incastro nel bottone di manovella è tutt'altro che perfetto a causa dei giochi;
- così facendo si è certamente a favore di sicurezza;
- si deve evitare che in esercizio i cuscinetti della biella debbano fungere da incastri, che renderebbero stabile la biella, perché ciò porterebbe ad una pressione di contatto non uniforme sul cuscinetto stesso, con usura eccessiva.

Con questa ipotesi, quindi, la snellezza sui due piani deve essere simile, oppure, nelle bielle molto veloci, leggermente maggiore sul piano frontale a causa del momento flettente. Se, invece, ci si imbatte in una biella esistente, è facile constatare quale sia stata la scelta del progettista:
se il rapporto tra le snellezze è circa 0,5 i vincoli sul piano laterale sono stati considerati pattino-incastro, se è circa 0,7 saranno incastro-carrello.

Bisogna ricordare che valori di snellezza tipici per le bielle si aggirano intorno a 10-20, quindi non è utilizzabile la formula di Eulero, che vale solo per aste di notevole snellezza.
Per aste "intermedie", Figura 7.9, come nel caso in esame, non ci sono teorie, ma solo formule empiriche, come per esempio quella qui utilizzata, che è la formula di Johnson (7.1):

$$\sigma_{cr} = R_{P\,0.2} - \frac{1}{E}\left(\frac{R_{p\,0.2}\,\lambda}{2\pi}\right)^2 \qquad (7.1)$$

dove λ è la snellezza e $R_{p\,0.2}$ il carico di snervamento del materiale.

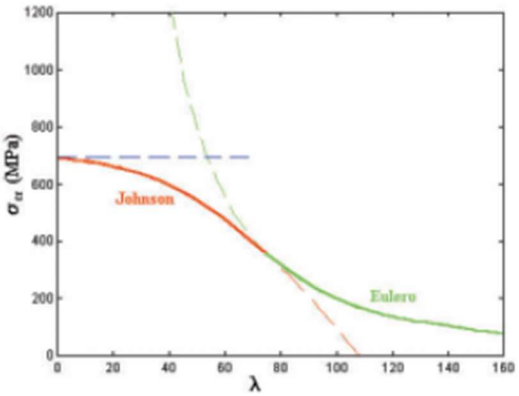


Figura 7.9 Sforzo critico al variare della snellezza per un acciaio con carico di snervamento di 700 MPa.

Finora si è trascurata la presenza del momento flettente, che potrebbe seriamente peggiorare la situazione; in effetti si può continuare a trascurarlo per regimi inferiori ai 3000- 5000 giri/min, oltre è d'obbligo tenerne conto. Affrontare il problema dal punto di vista analitico è piuttosto complesso, anche se fattibile; esiste anche un altro metodo.
È disponibile in letteratura la formula della secante (7.2) che è la soluzione analitica al problema dell'instabilità quando il carico assiale è decentrato rispetto al baricentro della sezione della trave:

$$\sigma_{cr} = \frac{R_p}{1+\left(\frac{ec}{\rho^2}\right)sec\left(\frac{l_c}{\rho}\sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{4E}}\right)} \qquad (7.2)$$

dove *e* è l'eccentricità, ρ il raggio d'inerzia e *c* è la distanza della fibra più esterna dall'asse neutro. Questa eccentricità genera un momento parassita che è dato dalla forza per l'eccentricità. Nel caso della biella il carico è esattamente centrato, però si può calcolare un'eccentricità equivalente che generi lo stesso momento flettente dovuto alle inerzie.
È comunque assai raro trovare coefficienti di sicurezza molto grandi (maggiori di 2), ma si può stare tranquilli perché:
- la snellezza è piuttosto bassa, tanto che usualmente non si esegue neppure la verifica;
- si è considerato anche il momento flettente, quindi la condizione dinamica (che richiederebbe coefficienti di sicurezza ben maggiori) è ricondotta ad una di tipo statico.

Avendone la possibilità è consigliabile, soprattutto per applicazioni critiche, eseguire una prova di instabilità con gli elementi finiti. L'analisi numerica può tener conto di tutti i fattori che si sono dovuti approssimare, come la variazione di sezione, la presenza delle teste e la reale distribuzione del momento flettente.

7.4 Le teste

Conoscere lo stato di sforzo nelle teste è stato oggetto di molti studi che però hanno portato a pochi risultati immediatamente impiegabili; per questo l'aiuto degli elementi finiti è indispensabile.
Si può comunque svolgere una breve valutazione analitica, per avere un termine di confronto con il metodo numerico. Se si considerano le teste come degli anelli sottili si può trascurare il momento flettente e immaginare che ci sia solo sforzo circonferenziale, esattamente come una corda che si avvolge attorno a un cilindro. Se tiriamo entrambe le estremità della corda con una forza F, in assenza d'attrito tutta la corda sarà sollecitata dalla forza F.
Perciò, calcolata la forza massima, 2F, di trazione che la biella esercita sulla testa, l'anello vedrà una forza di trazione F che è la metà di quella totale. In questo modo si può condurre la verifica a fatica per l'anello; nel piede lo sforzo massimo si concentrerà in prossimità della fresatura di lubrificazione, il cui coefficiente d'intaglio è identico a quello di una piastrina intagliata, che si trova su qualsiasi manuale. Per l'occhio di biella la parte critica è la bullonatura, nel caso di biella scomponibile.
Essendo la biella in esame monopezzo e non con la testa apribile, non occorre studiare le bullonature in quanto non sono presenti.

Conclusioni

Da questo lavoro di tesi è stato possibile analizzare a livello teorico i principali problemi che insorgono per la progettazione di una biella di tipo veloce con testa in un solo pezzo, facendo particolare attenzione al problema della distribuzione delle masse, analizzando due differenti metodi il primo più storico e meno preciso ma comunque affidabile, mentre il secondo più moderno e preciso. Un altro problema analizzato è la verifica a fatica, ma soprattutto la verifica all'instabilità elastica e come questa sommariamente va trattata per ottenere una biella affidabile nel tempo.
La progettazione si traduce successivamente in un disegno tecnico meccanico che deve rispettare determinate regole trattate in diverse norme tecniche: UNI 3963 per la definizione della rugosità nel componente in base alla lavorazione e sua rappresentazione nel disegno; UNI ISO 286 per la specifica delle tolleranze dimensionali presenti in maniera assidua nel disegno ma soprattutto nelle zone di accoppiamento piede e testa di biella; UNI 7223 per la scelta delle tolleranze geometriche più adatte al pezzo per contenere i costi, il loro posizionamento ed indicazione nel disegno.
Una parte della progettazione per la raggiunta delle caratteristiche meccaniche usate in fase di progetto si traduce nel ciclo di lavorazione, che se sbagliato può creare una biella che non rispetta i canoni richiesti in progettazione. Si costituisce così una scaletta di lavorazioni dove per prima si ha la forgiatura, se in grandi serie in stampo chiuso, della biella a partire da un massello. Successivamente si hanno le varie lavorazioni per asportazione di truciolo come le fresature degli occhi e superficie laterale di piede e testa. Si passa poi ai trattamenti termici come la carbocementazione, con successiva doppia tempra, per avere un cuore più duttile e una superficie più dura. Siccome la durezza ottenuta dalla tempra è ancora troppo alta si effettua un processo di rinvenimento. Alla fine dei trattamenti termici si effettuano le lavorazioni di finitura come la rettifica e la lappatura della testa. L'ultimo trattamento è una distensione in olio della biella.
Tutte queste informazioni sono prescritte e ricavabili dal disegno del componente, strumento di comunicazione universale tra ufficio tecnico di progettazione ed officine.

Bibliografia

Baldassini L., Vademecum del disegnatore meccanico, Hoepli, 2004
Caligaris L., Fava S., Tomasello C., Manuale di meccanica, Hoepli,2006
Cigada A., Pastore T., Struttura e proprietà dei materiali metallici, McGraw-Hill, 2012
G. Ferrari, Motori a combustione interna, Edizioni il Capitello
Giovannozzi R., Costruzione di macchine, vol. 2, Patron editore, 1964
Perotti G., Tecnologie siderurgiche, Levrotto e Bella, 1976
Straneo S.I., Consorti R., Disegno di costruzioni di macchine, Principato, 1984